

**APLICACIÓN DEL METODO ANÁLISIS DE FALLA Y CAUSA RAÍZ A EL
COMPONETE “VALVE TAPPET” DEL MOTOR TWIN WASP SIC3G PRATT &
WHITNEY**

PABLO ENRIQUE NUÑEZ VARON

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA, INGENIERÍA AERONÁUTICA
MATERIALES DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C.**

2018

**APLICACIÓN DEL METODO ANÁLISIS DE FALLA Y CAUSA RAÍZ A EL
COMPONETE “VALVE TAPPET” DEL MOTOR TWIN WASP SIC3G PRATT &
WHITNEY**

PABLO ENRIQUE NUÑEZ VARON

**PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TITULO COMO INGENIERO
AERONÁUTICO**

**DIRECTOR DEL PROYECTO
FRANCISCO JAVIER GONZALES CRUZ**

**CODIRECTOR DEL PROYECTO
JORGE LUIS NISPERUZA TOLEDO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA, INGENIERÍA AERONÁUTICA
MATERIALES DE INGENIERÍA
BOGOTA D.C.**

2018

Proyecto de grado aprobado por la
Facultad de Ingeniería de La Fundación
Universitaria Los Libertadores en
cumplimiento de los requisitos exigidos
para otorgar el título de: **Ingeniero
Aeronáutico**

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. 7 de Diciembre del 2018

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GENERAL	5
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	5
3. FUNDAMENTO – LÍQUIDOS PENETRANTES	6
3.1 ENSAYO	6
3.2 PENETRANTES.....	7
3.3 PROPIEDADES FÍSICAS.....	8
3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.....	10
3.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES.....	12
3.6 PROCESO PARA ELIMINAR EL EXCESO DE LÍQUIDO PENETRANTE.....	14
3.7 REVELADORES	17
4. FUNDAMENTO – ANÁLISIS DE FALLA.....	19
4.1 FALLA	19
4.2 CAUSAS DE FALLO.....	22
4.3 MODOS DE FALLO.....	27
4.4 ANÁLISIS DE FALLA	31
4.5 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE FALLA	35
5. FUNDAMENTO- ANÁLISIS CAUSA RAÍZ.....	43
5.1 MÉTODOS GRÁFICOS PARA RCA.....	44
5.2 THE 5-WHYS.....	46
6. INSPECCIÓN VISUAL DEL COMPONENTE	47
6.1. MECANISMO DE VALVE TAPPET	48
6.2. INSPECCIÓN VISUAL.....	50
6.3. REVELADO POR TINTA PENETRANTE CON REVELADOR	51
7. ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL	54
8. ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	60
8.1. METALOGRAFÍA PROBETA A.....	61
8.2. METALOGRAFÍA PROBETA B.....	62
9. ANÁLISIS DE FALLA RCA	63
10. METODOLOGIA	67
10.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
11. CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71

RESUMEN

En este proyecto se realizó el análisis de falla y el análisis de causa raíz a el componente denominado “Valeve Tappet “ del motor Twin Wasp Sic3g Pratt & Whitney, el cual es un componente mecánico que se encuentra en esfuerzo compuesto axial, con carga cíclica y una tensión de compresión. Y el cual presenta falla por desgaste superficial que se define como desgaste abrasivo y es fácil de evidenciarlo, pero, por el cual el componente no fue remplazado, también presenta dos gritas no perceptibles en diferentes puntos del componente, los cuales son originados por un suceso de condición de falla en su operación y son el objeto de estudio.

Tabla de Figuras

- Figura 1-1.** Distribución de falla en el tiempo, curva de “tina de baño”. [1]
- Figura 1-2.** Analogía de Investigación en forma de pirámide.[31]
- Figura 3-1.** Fundamento por líquido penetrante.[2]
- Figura 3-2.** Clasificación de los líquidos penetrantes. [2]
- Figura 3-3.** Test líquidos penetrantes. [2]
- Figura 3-4.** Tiempo Crítico. [2]
- Figura 4-1.** Diagrama de flujo que muestra la relación entre la fase de diseño y la tarea de investigación para fallas en servicio, envejecimiento estructural y acciones correctivas. [3]
- Figura 4-2.** Palabras clave descriptivas del desgaste y sus interrelaciones.
- Figura 4-3.** Desgaste adhesivo. [4]
- Figura 4-4.** Circulo de Fallos. [5]
- Figura 4-5.** Modelo de resolución de problemas. [1]
- Figura 4-6.** Mínimo ángulo para una inspección visual. [6]
- Figura 4-7.** Tabla de identificación de modos de fallo a partir de inspección visual y con la ayuda de un microscopio .[2]
- Figura 4-8.** Profundidad de penetración por el método Rockwell. [32]
- Figura 5-1.** Analogía del análisis de falla. [4]
- Figura 5-2.** Ejemplo diagrama de espina de pescado. [1]
- Figura 5-3.** Esquema jerárquico de The 5-Whys.[48]
- Figura 6-1.** Sección de Caja del cigüeñal [39].
- Figura 6-2.** CAD Componente Valvet Tappet.

Tabla de Fotos

Foto 6-1.	Componente Mecánico “Valve Tappet”.
Foto 6-2.	Líquido Penetrante y Revelador.[14]
Foto 6-3.	Aplicación del Líquido Penetrante.[14]
Foto 6-4.	Indicación de Falla con Revelador en el Componente “ Valve Tappet”[14]
Foto 6-5.	Indicación de Falla con Revelador Fluorescente en el Componente Valve Tappet.[15]
Foto 7-1. (a).	Durómetro Rockwell.[15]
Foto 7-1. (b).	Patrón de Calibración 61,8 HRC.[15]
Foto 7-1. (c).	Calibración con patrón a 61,8 HRC.[15]
Foto 7-2. (a).	Corte de las Probetas. [15]
Foto 7-2. (b).	Probeta Falla A. [15]
Foto 7-2. (c).	Probeta Falla B. [15]
Foto 7-3.	Ensayo de Dureza. [15]
Foto 8-1. (a).	Microscopio Metalográfico.
Foto 8-1. (b).	Lentes de Observación Probeta A. [15]
Foto 8-1. (c).	Pulidora Metalográfica. [15]
Foto 8-2. (a).	Probeta A. [15]
Foto 8-2. (b).	Puntos de Observación. [15]
Foto 8-2. (c).	Punto 1,10x. [15]
Foto 8-2.(d).	Punto 2,100x. [15]

Foto 8-2. (e). Punto 3,20x. [15]

Foto 8-2. (f). Punto 4,50x. [15]

Foto 8-3. (a). Probeta B. [15]

Foto 8-3. (b). Puntos de Observación Probeta B. [15]

Foto 6-3. (c). Punto 1,100x. [15]

Foto 6-3. (d). Punto 2,100x. [15]

Foto 6-3. (e). Punto 3,50x. [15]

Foto 6-3. (f). Punto 4,10x. [15]

1. INTRODUCCION

Los ensayos no destructivos y el análisis de falla en un sólido mediante los diversos métodos que hoy en día existen son fundamentales para el desarrollo de la Industria Aeronáutica; ya que estos se han destacado al pasar de los días, en la innovación de áreas afín con la ingeniería, tales como el diseño de máquinas, la selección de materiales, la confiabilidad en el mantenimiento y la seguridad operacional donde son vitales a la hora de ofrecer eficiencia y productividad, encaminadas a disminuir los costos en el mantenimiento al igual que al reducir en cierta manera la pérdida de vidas humanas; ya que a pesar de que el avión sea el medio de transporte más seguro en la actualidad, se han venido presentando lamentables accidentes aéreos a lo largo de la historia, que en cierta forma se hubieran podido evitar con tan solo haber hecho un análisis de falla.

Debido al aumento de costos vinculado con la compra de nuevos aviones, muchas aerolíneas se ven obligadas a ampliar la vida útil de su flota actual y hacer más eficientes sus programas de mantenimiento. Por tal razón se requiere un sistema de prueba rápido y fiable que reduzca a un mínimo los períodos no operativos, pero no comprometa las normas esenciales de seguridad que exigen las aerolíneas al igual que los entes reguladores de cada país. Por esta razón es viable hacer un análisis de la vida útil de cada uno de los componentes. Para evitar accidentes e incidentes en su operación, evitando la pérdida de vidas humanas. Esto nos lleva a un análisis de falla con el fin de establecer la causa raíz, determinando las acciones pertinentes como puede ser el caso de cambio de un componente y así alargar la vida útil operacional de una aeronave, además de lograr una programación de mantenimiento eficiente, el cual es adecuado para un control efectivo en el funcionamiento de los componentes y el así garantizar su fiabilidad en la operación.

La *American Society for Metals* (ASM) define el Análisis de falla como: *“Un proceso que combina diversas técnicas con el fin de determinar las causas y factores que han conducido a una pérdida no deseada de la funcionalidad.”* [6]

El análisis de falla por definición es un estudio multidisciplinar que une conocimientos de muchas áreas de la ciencia pero, involucrando directamente al diseño y la caracterización de materiales como verdaderos responsables del producto final, ya que gracias a estas dos disciplinas, aunque diferentes en sus campos de estudio, se complementan la una con la otra, por que como es bien sabido el diseño analiza los esfuerzos a las cuales va hacer sometida la pieza, y la caracterización define cual es el material más idóneo para tal fin. Realizar un análisis de falla de amplias proporciones dependiendo del caso a estudiar podría

emplear conocimientos de Ingenieros expertos en: Fatiga, Corrosión, Metalurgia, Transferencia de calor, Mecánica de fluidos, Ingeniería Aeronáutica, Hidráulica, Ensayos no destructivos, Mantenimiento, etc. Por esta razón elaborar un estudio preciso, que determine las causas de fallo con el fin de detectar errores de diseño o de operación, para evitar accidentes o similares. Y tener puntos de referencia o situaciones en las cuales no se pensaba que pasarían por ingenuidad o por descuido de diseño a mantenimiento y ver lo como una oportunidad de mejora de piezas o procesos.

Un componente mecánico puede pasar por tres periodos de tiempo en su funcionamiento (desde la perspectiva de la falla), las cuales son:

- Un primer periodo en el cual puede sufrir algún tipo de falla prematura o temprana.
- Un segundo periodo de funcionalidad en donde desarrolla su tiempo de vida útil con posibles probabilidades de que sufra algún daño.
- Un tercer periodo en el cual se evidencia desgaste debido a su funcionamiento y por ende a su obligatoria sustitución, aunque no siempre es visible la falla por ello se suele utilizar métodos de detección denominados ensayos no destructivos.

La vida de servicio es apreciable en la Figura 1-1,

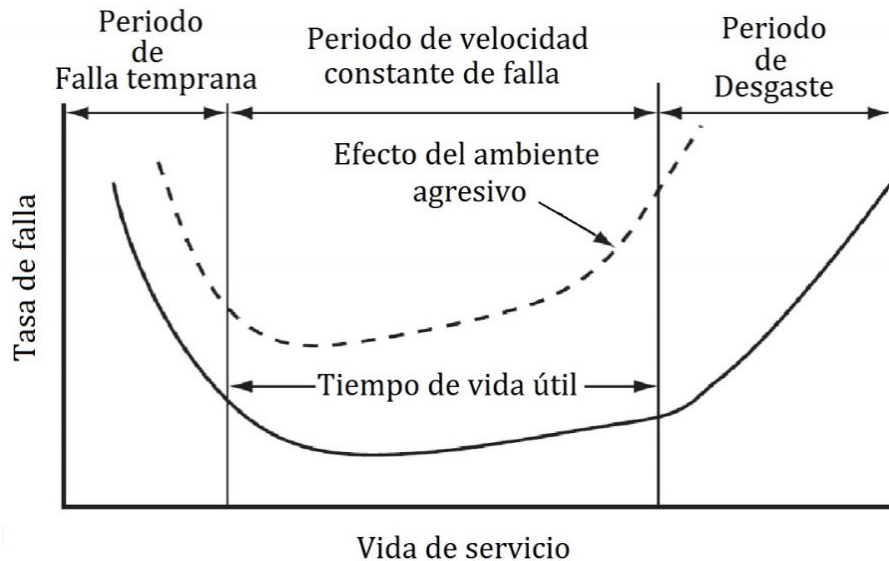


Figura 1-1. Distribución de falla en el tiempo, curva de "tina de baño"[1]

De otra manera el análisis de casusa raíz (RCA, por sus siglas en inglés) es la parte complementaria del análisis de falla como metodología criminalística. Por si solo el análisis de falla no daría los resultados esperados ya que su alcance puede, pero no necesariamente, conducir a una causa raíz corregible del fallo. [7], RCA es una serie de pasos lógicos secuenciales que el investigador logra aislar, determinando los hechos que rodean un evento de falla,[28] Una vez que el problema sea totalmente definido, el análisis determina sistemáticamente el mejor curso de acción que resolvería el evento, razonando la causa más básica de fallo donde el investigador tiene control para corregir y asegurar que no se repita, esto puede implicar la identificación y gestión de procesos, procedimientos, actividades, inactividad, comportamientos o condiciones .[9][28][33].



Figura 1-2. Analogía de Investigación en Forma de Pirámide [31]

Basado en lo anterior el objetivo de este proyecto es determinar mediante el Análisis de falla una visión general de cada fallo encontrado en los tres componentes mecánicos seleccionados, implementando la búsqueda de pistas de fallo empleando técnicas como inspección visual análisis metalográfico y análisis de dureza a partir de los cuales se podrían determinar los factores de pérdida de funcionalidad, con esto el siguiente paso sería el uso de RCA en el cual se plantearan todas la posibles raíces de fallo que se irán descartando, reduciendo el sesgo de posibilidades hasta lograr determinar la causa raíz de fallo, emitiendo una serie de recomendaciones que podrían prevenir la reiteración de la falla encontrada en piezas mecánicas similares a las estudiadas. Tal como se observa en la Figura 1-2 la analogía expresa que la investigación conformara una base sólida a partir del análisis de falla, seguidamente RCA será el segundo escalón y por último el reporte y conclusiones darán finalización al estudio de los componentes mecánicos. [55]

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz al componente denominado “valve tappet” del motor Twin Wasp Sic3g Pratt & Whitney, con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2 Objetivo Específicos

- Obtener el componente mecánico “valve tappet” que hayan sufrido falla.
- Hacer inspección con tintas penetrantes con el fin de buscar indicaciones de falla en el material.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, según las normas ASME -E165, ASTM E 18-15, ASTM E3-01, ASME 340, que permitan evidenciar las posibles causas raíz de fallo.
- Determinar las posibles causas de fallo de las piezas seleccionadas mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz con el fin de emitir un concepto, para evitar la falla del componente debido a la misma causa.

3. FUNDAMENTO – Líquidos Penetrantes

3.1 Ensayo

El ensayo por líquidos penetrantes es un método de ensayo no destructivo que permite visualizar la discontinuidad en materiales no porosos siempre y cuando la discontinuidad se encuentre abierta a la superficie.

Si comparamos otros métodos de ensayos no destructivos (Radiografía, Ultrasonido o Corrientes inducidas), la aplicación práctica del ensayo por líquidos penetrantes, en general es menos compleja y no requiere el uso de equipos complicados de operar o costosos, pero no por esto hay que olvidar las precauciones o cuidados que debemos tener al realizar este tipo de ensayo y más a un a la hora de dar un diagnóstico. [2] El método por líquidos penetrantes puede llegar hacer muy útil en el campo del mantenimiento preventivo ya que nos permite evidenciar defectos en el material que quizás son imperceptibles por simple inspección visual.[41]

El ensayo por líquidos penetrantes se basa en aplicar un líquido aplicado a la superficie en cuestión de análisis, el cual penetra en la discontinuidad lo que nos genera una indicación como se puede apreciar en la Figura 3-1. Esto es debido al efecto capilar [2]

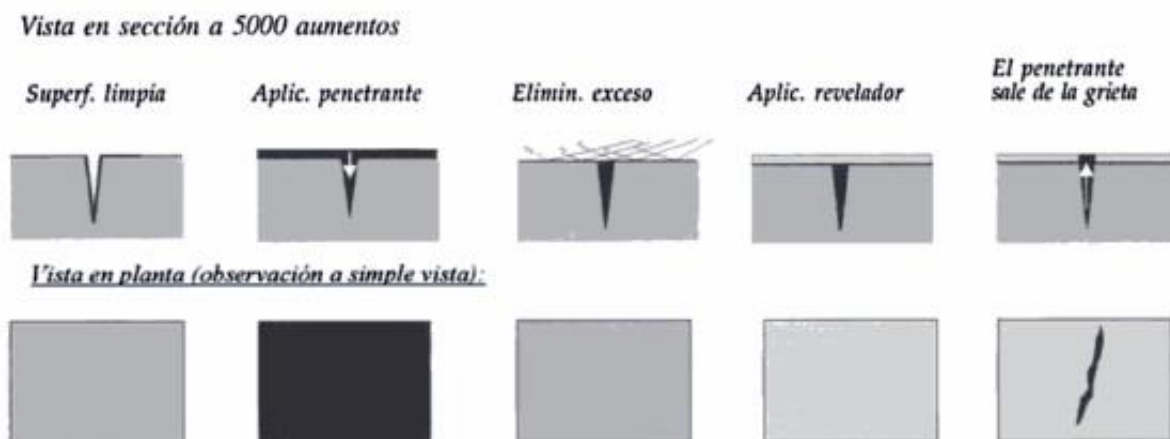


Figura 3-1. Fundamento por Líquido Penetrante. [2]

De forma que, al limpiar el exceso de líquido de la superficie, quede solamente el líquido introducido en la discontinuidad. Posteriormente este líquido, ayudado generalmente por un agente denominado revelador, señala sobre las superficies las zonas que tiene discontinuidad o para nuestro estudio una falla.

3.2 Penetrantes

La característica fundamental de un líquido para que se utilice en el ensayo con líquidos penetrantes es su poder de penetración, pero no es suficiente para hacerlo apto para el ensayo de posibles defectos en las piezas. Debe tener además otras propiedades que le confieran, en su conjunto, esa aptitud.

Un penetrante ideal debería reunir las siguientes características generales:

- Capacidad para introducirse con facilidad en discontinuidades o grietas muy finas.
- No evaporarse o secarse con demasiada rapidez.
- Poder mantenerse en el interior de discontinuidades más anchas y poco profundas.
- Que se pueda eliminar de la superficie con facilidad y sin que la operación de limpieza superficial afecte al penetrante retenido por la discontinuidad.
- Permanecer en estado líquido para salir con facilidad al aplicar el revelador.
- Conservar el color o la fluorescencia por un tiempo suficiente.
- No ser corrosivo ni atacar a los materiales que se ensayan.

Otras características, no menos importantes, son las siguientes:

- No tener olor intenso o desagradable, ni tener componentes tóxicos.
- No ser inflamable.
- Ser estable a las temperaturas de uso o almacenamiento.
- Ser económicamente rentable.

El conjunto de todas estas características difícilmente se pueden encontrar en una sola sustancia, por esto los líquidos penetrantes que se encuentran en el comercio son mezclas de muy diversas composiciones que se aproximan más o menos a las características requeridas por un penetrante que pudiera estimarse como ideal.

Los productos que forman parte de la composición de un líquido penetrante son derivados del petróleo. Las características adecuadas se consiguen mezclando hidrocarburos pesados con otros más volátiles.

3.3 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del líquido penetrante que hace que obtenga las características señaladas en el apartado 3.2 y son las siguientes:

- Poder humectante y tensión superficial

Mientras que la tensión superficial es una característica propia del líquido, el poder humectante depende también del material de la superficie de donde se aplica el líquido.

Para aumentar el poder de penetración, interesa que el penetrante tenga un poder humectante elevado, para lo que se añaden en la composición del mismo agentes tensoactivos que reducen considerablemente el ángulo de contacto, de forma que un buen líquido penetrante se caracteriza más por conseguir un ángulo de contacto muy pequeño que por el valor de su tensión superficial.

- Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

Es otra propiedad del líquido penetrante que influye sobre la viscosidad de penetración del líquido en las discontinuidades. Cuanto menos viscoso sea menor será el tiempo de espera para que entre en las discontinuidades y menos líquidos se gastará por unidad de superficie ensayada. Pero también será más fácil que el penetrante sea arrastrado de las discontinuidades al limpiar el exceso de la superficie, lo que haría el ensayo nulo. Para evitar esto, se necesita una cierta viscosidad del penetrador, siendo adecuada una viscosidad intermedia.

- Volatilidad

Se define como una medida de la facilidad con que una sustancia se evapora, por esto, ha de ser baja, ya que de ella depende en gran parte su estabilidad en forma líquida una vez que ha sido extendido sobre la superficie.

- Inactividad química. Corrosión

El penetrante ha de ser inactivo químicamente con respecto tanto a los materiales examinados como a los recipientes en que se almacena.

Los riesgos de corrosión más importantes se presentan con:

- ✓ El titanio y sus aleaciones en presencia de halógenos.
- ✓ Los aceros inoxidables austeníticos en presencia de cloro.
- ✓ Algunas aleaciones de níquel en presencia de azufre y de cloro.
- ✓ El aluminio y sus aleaciones en presencia de productos alcalinos.

Es importante tener en cuenta que si queda penetrante retenido en las discontinuidades después de la limpieza final, se puede presentar corrosión a largo plazo.

- Toxicidad

Debe ser lo menor posible por su importancia en lo referente a condiciones de higiene y seguridad por el efecto sobre los operadores, en especial en los lugares cerrados.

- Temperatura de ebullición. Temperatura de inflamación

El uso de líquidos penetrantes con la temperatura de ebullición baja supone pérdidas importantes por evaporación, necesidad de impregnación por inmersión total y puede llevar a una disminución de la sensibilidad si la evaporación del penetrante retenido en las discontinuidades es importante.

Los productos penetrantes industriales que se emplea para el ensayo, son productos poco volátiles a los que se añade una cantidad de disolvente volátil suficiente para obtener una viscosidad baja que permita obtener velocidades de penetración altas.

Para reducir los riesgos de explosión o de incendio, la temperatura de inflamación de los productos penetrantes utilizados en la industria deben ser lo más alto posible; la mayor parte de estos productos disponibles en el mercado tienen temperatura de inflamación superior a 65°C.

3.4 Clasificación de los Líquidos Penetrantes

La clasificación básica de los tipos de líquidos penetrantes existentes es la que los agrupa en función de la fuente de luz que se precisa para la observación de las indicaciones que proporciona el ensayo. Se clasifica en tres grupos o familias que son:

- 1) Líquidos penetrantes coloreados, observación con luz visible blanca.
- 2) Líquidos penetrantes fluorescentes, observación con luz negra (ultravioleta).
- 3) Líquidos penetrantes mixtos (fluorescentes-coloreados), observación bajo los dos tipos de luz ya mencionadas.

Paralelamente, en cada familia, se pueden encontrar tres casos posibles de empleo en función de la forma de eliminar de la superficie el exceso de penetrante:

- A. Líquidos penetrantes lavables con agua.
- B. Líquidos penetrantes postemulsionables.
- C. Líquidos penetrantes eliminables con disolventes.

Los penetrantes postemulsionables se llaman así porque necesitan la adición posterior de un emulsionante para hacerlo lavables con agua. [8]

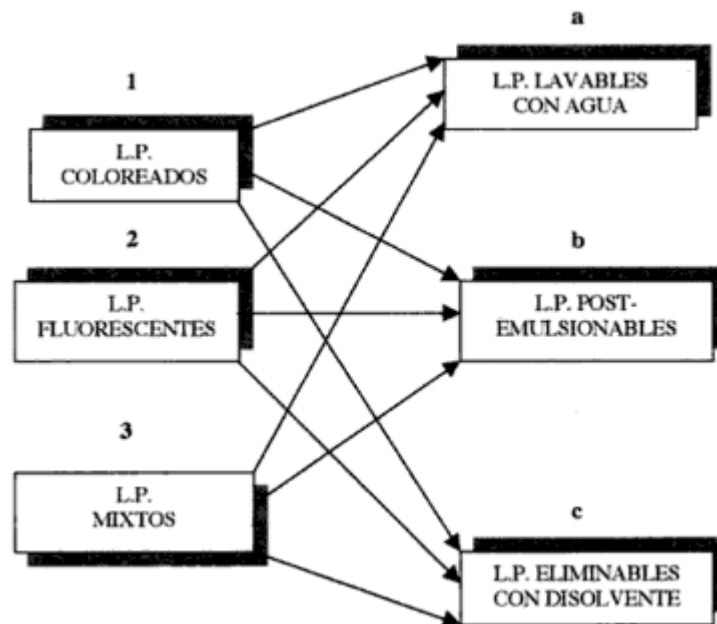


Figura 3-2. Clasificación de los Líquidos Penetrantes. [2]

Los líquidos penetrantes mixtos son permanentes especiales que contienen en su composición pigmentos fluorescentes mezclados con pigmentos coloreados. Estos líquidos penetrantes se conocen también con el nombre de “penetrantes de doble sensibilidad”.

Conviene resaltar que no se debe realizar un ensayo con penetrantes fluorescente a continuación de haber realizado un ensayo con penetrantes de color o con penetrantes mixtos. El motivo de esto es que los pigmentos de color pueden disminuir o exponer la acción de los fluorescentes.[2]

3.5 Características de los Líquidos Penetrantes

- Líquidos penetrantes de color visible

En su composición contiene pigmentos coloreados disueltos que los hace visibles con luz natural o con luz artificial blanca. El color más utilizado es el rojo que hace claramente visible las indicaciones sobre el fondo normalmente blanco del revelador.

Aunque la sensibilidad de estos penetrantes rojos suele ser inferior a la de los fluorescentes, resultan adecuados para un gran número de aplicaciones. Así, los más empleados en general en los talleres y en inspecciones que se realizan a pie de obra son los penetrantes rojos eliminables con disolvente, suministrado en botes aerosol por ser los de aplicaciones más sencilla y no requiere agua para lavado ni lámparas especiales para la observación, como los fluorescentes. [2]

- Líquidos penetrantes fluorescentes

Este tipo de líquido penetrante incorpora en su composición pigmentos fluorescentes de color por lo general amarillo verdoso, que son sensibles a una iluminación especial llamada luz negra que los hace fluorescer.

En general estos líquidos penetrantes fluorescentes tienen una mayor sensibilidad que los de colores y son capaces de detectar indicaciones más finas. [2] [9]

- Líquidos penetrantes lavables con agua

Este tipo de líquidos es de uso muy cómodo y su empleo está bastante extendido, a pesar de su menor sensibilidad. Los líquidos penetrantes (líquidos tipo aceite ligero, derivados del petróleo) por sí mismos no son solubles en agua. El tipo de penetrante “lavable con agua” incorpora en su composición un agente emulsionante que permite que el producto se pueda eliminar por lavado con agua.

Un emulsión es un líquido formado por al menos dos sustancias que no son miscibles, de las cuales una está dispersa en la otra (fase continua) en estado de gotas muy finas. Ejemplo, si se agita agua que contiene una pequeña cantidad de aceite, la agitación mecánica hace que este se disperse en el agua y forma una emulsión de aceite en agua, que es aquí la fase continua. Una emulsión así no es estable y los dos líquidos se separan de nuevo después de un tiempo. La estabilidad se consigue añadiendo un tercer elemento (jabón, o detergente y es el emulsionante) y que es un elemento tenso activo que disminuye la tensión entre caras y permite obtener una emulsión estable y finamente dividida.

- Líquidos penetrantes post-emulsionables

Como este tipo de penetrante no lleva en su composición el emulsionante, necesita una etapa inmediata, necesita una etapa intermedia (después de transcurrir el tiempo de penetración y antes de la eliminación del exceso de penetración con agua) en la que se aplica el emulsionante. La mezcla penetrante-emulsionante es ya una emulsión que se puede eliminar por lavado de agua. El tiempo de contacto entre el penetrante y el emulsionante es crítico u debe ser en el menor tiempo posible, conforme a las especificaciones del fabricante. Si se incrementa el tiempo de contacto, el emulsionante se mezclará con el penetrante dentro de la discontinuidad. Esto puede ocasionar que en la etapa de lavado del exceso de penetrante de la superficie se extraiga a la vez penetrante del interior de la discontinuidad, alterando el resultado del ensayo.

- Líquidos penetrantes eliminables con disolvente

Estos penetrantes requieren para su eliminación el empleo de un disolvente que se denomina “eliminador”. Por lo general los eliminadores a base de disolventes, son productos especiales, particularmente formulados por cada fabricante y apropiados para eliminar sus propios penetrantes. Al igual que en el caso anterior, el eliminador debe estar en contacto con el penetrante el tiempo suficiente para eliminar el exceso del mismo, pero este tiempo debe ser el mínimo para no correr el riesgo de eliminar parcial o totalmente el penetrante del interior de las discontinuidades.[2]

3.6 Proceso para Eliminar el Exceso de Líquido Penetrante

- Agua

En los procesos de líquidos penetrantes eliminables con agua se puede emplear agua, algunos materiales (aceros inoxidables austeníticos, aleaciones base níquel, titanio o cobalto) se exige que el contenido de halógenos (cloro) esté por debajo de unos límites especificados. También se prescriben límites para temperatura y presión del agua de lavado.

- Emulsionantes

En los procesos de líquidos penetrantes postemulsionables, es necesario como se ha señalado anteriormente la aplicación de un emulsionante para poder lavarlos con agua. Los emulsionantes empleados para el ensayo con líquidos penetrantes son de dos tipos:

- ✓ Lipofílicos (soluble en aceite)
- ✓ Hidrofílicos (soluble en agua)

a) Emulsionantes lipofílicos

Se componen de agentes emulsionantes dispersos o disueltos en un aceite. Se utilizan tal como se suministran. Son solubles en el penetrante (aceite) y no solubles en el agua. El emulsionante de este tipo se mezcla con el penetrante y el penetrante con el emulsionante por el movimiento de sus moléculas en un proceso de difusión, que se incrementa si aumenta la temperatura y la concentración. El penetrante queda recubierto por una capa de emulsionante. El tiempo de contacto es crítico con este tipo de emulsionante. Figura 3.3

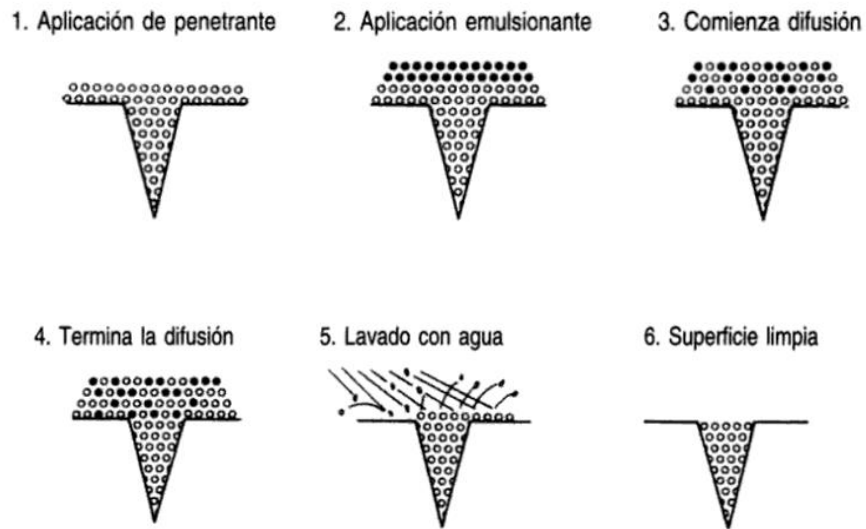


Figura 3-3. Test Líquidos Penetrante.[2]

b) Emulsionantes Hidrofílicos

El emulsionante hidrofílico se suministra como un concentrado líquido de agentes emulsionantes, solubles en agua y no solubles en el penetrante. Este emulsionante se diluye en agua, antes o durante el proceso de lavado, y se aplica sobre la superficie impregnada de penetrante.

Al contrario que el emulsionante lipofílico, el hidrofílico no se disuelve en el penetrante, no hay difusión, y su acción consiste en disminuir la tensión superficial de la capa de penetración con la que está en contacto, actuando sobre una pequeña cantidad de penetrante y evitando que se vuelva a juntar con el resto del penetrante.

El exceso de penetrante, disperso en la solución acuosa, se elimina de la superficie de la pieza por lavado con agua, principalmente por desplazamiento mecánico. El tiempo de contacto es menos crítico con este tipo de emulsionante Figura 3-4.

1. Aplicación de penetrante



2. Aplicación emulsionante



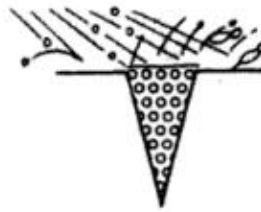
3. Comienza acción emulsiva



4. Termina acción emulsiva



5. Lavado con agua



6. Superficie limpia

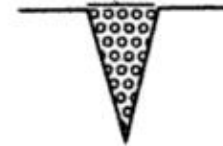


Figura 3-4. Tiempo Crítico. [2]

- Proceso de penetrantes eliminables con disolventes

En este proceso, los disolventes o eliminadores suelen ser productos especiales con formulación particulares de cada fabricante. Se pueden dividir en dos grupos:

- ✓ Inflamables
- ✓ No inflamables

Los que más se utilizan son los orgánicos no inflamables que son hidrocarburos halogenados, pero presentan el inconveniente de su mayor toxicidad. Los inflamables, no tóxicos, son hidrocarburos o mezclas de hidrocarburos exentos de halógenos.[2]

3.7 Reveladores

El revelador es el agente que pone de manifiesto los sitios en los que ha tenido lugar una retención de líquido penetrante.

Actúa como un papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad, y reduce el tiempo necesario para la indicación se haga visible. La absorción del penetrante por el revelador se debe a la presencia de gran cantidad de intersticios de pequeñas dimensiones que separan los granos de polvo de revelador. Por capilaridad el líquido asciende a través del revelador y se difunde en la capa superficial por lo que es indispensable para visualizar los defectos pequeños que la capa de revelador sea muy fina.

El revelador contribuye a aumentar la visibilidad de las indicaciones por ser de un color opuesto al del penetrante y proporcionar un fondo sobre el que contrasta el color del penetrante.

Para cumplir adecuadamente su misión, el medio revelador debe reunir las siguientes características:

- ✓ Gran capacidad de absorción del penetrante.
- ✓ Debe de estar finamente dividido (polvo muy fino) para conseguir una buena definición del contorno de las indicaciones. También así aumenta su capacidad de absorción.
- ✓ Debe ser de fácil aplicación y dejar una capa continua de espesor uniforme.
- ✓ Su color debe contrastar con el del penetrante (blanco para penetrante de color) y estar ausente de fluorescencia propia para los penetrantes fluorescentes.
- ✓ Tiene que ser eliminable fácilmente.
- ✓ No debe contener productos tóxicos para el operador que realiza el ensayo.
- ✓ No tiene que provocar corrosión en las piezas a ensayar.

Tipos de Reveladores:

- ✓ Reveladores de polvo seco

Fue uno de los revelados que se utilizaron (el yeso o el talco en forma de polvo muy fino), Hoy en día se puede utilizar con buenos resultados, si bien se ha descubierto otros productos que son más ligeros y proporcionan mejores resultados.

El polvo debe ser ligero, esponjoso y capaz de adherirse con facilidad a las superficies metálicas, formando sobre ellas una capa fina y continua. Un producto que cumpla producto que cumple bien estas especificaciones es la sílice amorfa pulverizada.

Con este tipo de revelador hay que tener cuidado para evitar que se contamine con penetrante fluorescente, ya que si ocurre aparecen indicaciones falsas en el ensayo.

Es importante que el revelador no tenga tendencia a flotar en el aire dando lugar a nubes de polvo ,pero esto no es siempre posible ya que se contrapone con otras propiedades fundamentales; por lo tanto el empleo de estos reveladores de polvo seco se hace inevitable la formación de estas nubes y la contaminación de la zona de trabajo, aspecto se debe tener muy en cuenta desde el punto de vista de la seguridad del personal que interviene en el ensayo ,o está en las proximidades del lugar donde se realiza. [2]

✓ Reveladores acuosos

Se suministra en forma de concertación de partículas de polvo seco y hay de dos tipos: para preparar es suspensión acuosa, o por disolución en agua, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del producto.

Tiene la ventaja de que al aplicarlos no forman nubes de polvo. Son de fácil aplicación y pueden llegar a cubrir zonas no accesibles con los reveladores del tipo de polvo seco.

✓ Reveladores húmedos no acuosos

Son suspensiones de polvo revelador en disolventes .Se suele utilizar en el proceso de penetración visibles de color rojo y son un polvo de color blanco en suspensión en un disolvente orgánico volátil, que se presenta envasado en forma de botes de aerosol, lo que facilita su aplicación por pulverización sobre la superficie de ensayo.

✓ Reveladores de película líquida

Estos reveladores son soluciones o suspensiones de resinas/polímeros en un medio adecuado que se aplica por pulverización siguiendo las instrucciones del fabricante.

Después de su aplicación forman un recubrimiento translucido o transparente sobre la superficie que se ensaya. Dentro de este tipo de reveladores se encuentra el que se denomina “pelable” porque permite levantar la capa de la superficie y guardar para tener un registro de las indicaciones obtenidas en el ensayo.

4. FUNDAMENTO – Análisis de Falla

4.1 Falla

Se considera que el material de un componente ha fallado cuando este se encuentra en una condición bajo la cual no puede cumplir con la función para la cual fue diseñado.

La falla de un material puede traer consigo altos costos, en términos económicos, de producción o incluso vidas humanas, por esta razón hacer un análisis en el que se pueda establecer por qué falló el material es de suma importancia, ya que a partir de este análisis se pueden identificar los errores que se cometieron en el diseño o el manejo que se le dio a dicho componente.

La labor de un analista al efectuar un análisis de fallo a un material se asemeja en cierta medida al trabajo realizado por un detective en la escena de un crimen, ya que el análisis busca poder examinar la pieza, su diseño, fabricación, condiciones de operación, así como también su principal fin, encontrar cómo y por qué falló. [10]

La falla en ingeniería se define como todo desempeño inaceptable e incorrecto en el funcionamiento previsto de algún componente, máquina, sistema o proceso. Dicha condición no permite realizar las funciones para las cuales se ha diseñado de manera segura, fiable y económica. La “falla” es simplemente el resultado físico de un conjunto de circunstancias preexistentes, una secuencia de acontecimientos, o una situación en desarrollo [3][1].

La falla puede ser definida en distintos niveles. El primer tipo es aquel donde el sistema o componente funciona pero no cumple el deseo final que se espera, esto se considera una pérdida de función, por ejemplo una lámpara de estacionamiento fallida en un automóvil, esta representa poca importancia en el desempeño total del coche como sistema de transporte, pero es un fallo (a un nivel muy bajo de falla), otro ejemplo se presenta en la falla de un motor a reacción que solo puede producir un empuje parcial, insuficiente para permitir que un avión despegue, es claro que funciona pero no cumple las expectativas de diseño y funcionalidad esperadas por el usuario. El siguiente nivel de fallo implica que el sistema o componente realiza su función pero de ninguna forma es confiable o seguro, la pérdida de vida útil es clara y de deben tomar acciones, por ejemplo un cable de subida y bajada de un ascensor ha perdido su vida útil al sufrir fracturas por fatiga en algunos de los alambres

individuales en su entretejido debido a irregularidades en el envoltorio sobre la polea, a pesar de que el cable sigue funcionando, la presencia de fracturas resulta en una condición insegura para los usuarios por lo tanto se considera un fallo. El último nivel de falla se presenta cuando el sistema o componente es inoperable, es decir ha sufrido un daño profundo y se requiere una sustitución inmediata, por ejemplo la fractura de un eje en una bomba, destrucción de un rodamiento, daño en cojinetes, etc. [13] [50].

La falla también se contempla desde la perspectiva de la vida humana, tal como se observa en la Figura 1-1, y explicada en la introducción de este proyecto.

La ocurrencia de fallas mecánicas tiene implicaciones significativas para todos los interesados, desde los científicos hasta los responsables políticos. Los beneficios de costos, las mejoras en el diseño y el crecimiento de la confiabilidad que surgen de las fallas y sus posteriores análisis son lo suficientemente enormes como para hacer que la inversión a largo plazo de estos estudios valga la pena. El dicho “la basura de un hombre es el tesoro de otro hombre” se aplica a las fallas, es indiscutible que las historias de fracasos son generalmente mucho más útiles que las historias de éxito. [11] [12]

En la Figura 4-1 se muestra la relación de todos los aspectos en la vida de un componente, desde la fase de diseño, vida de servicio, análisis sistemático de fallas y estudio post funcionamiento. Todo ello contribuye a un mejoramiento en las distintas prácticas que desarrollan un producto. [13]

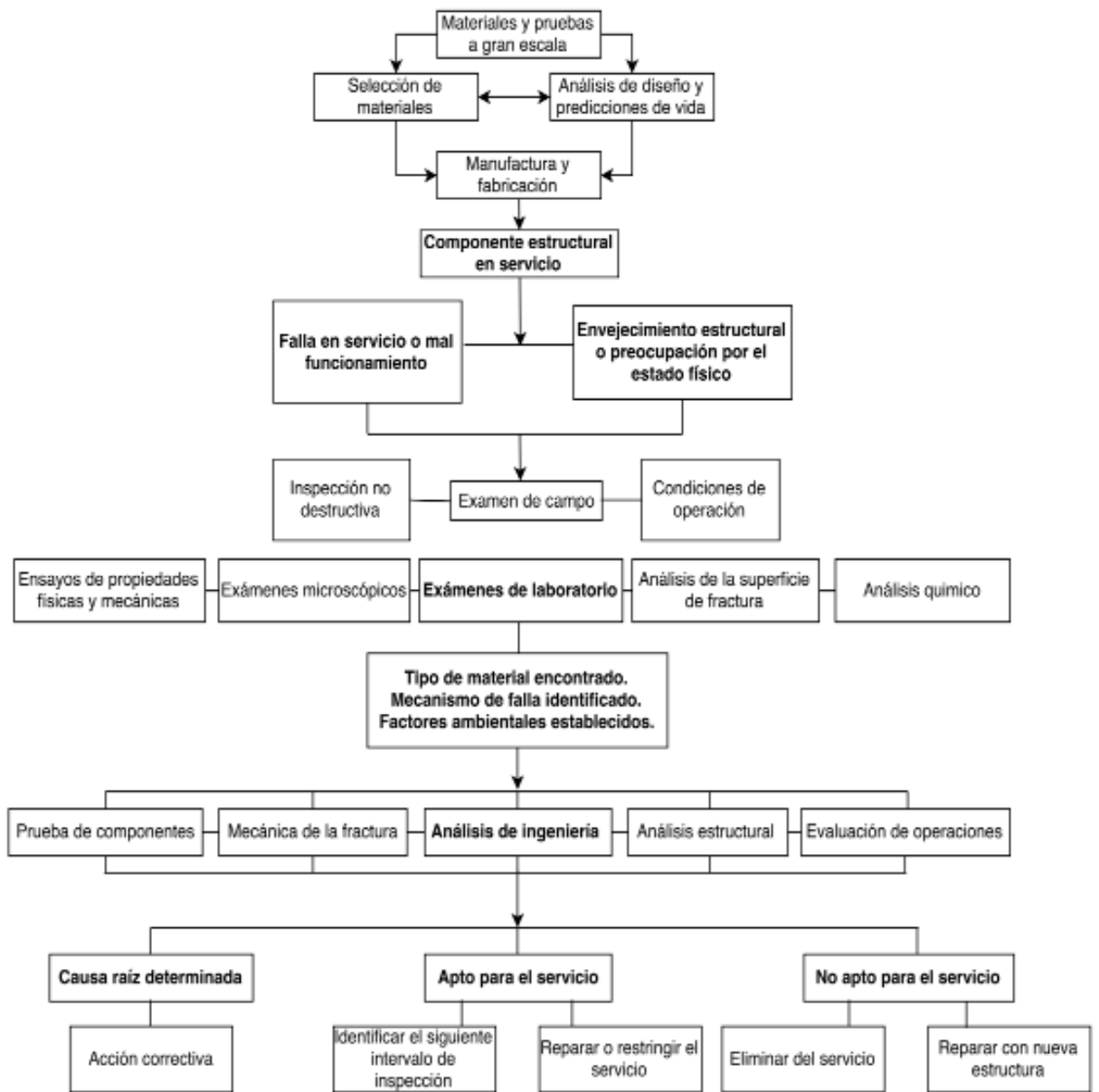


Figura 4-1. Diagrama de flujo que muestra la relación entre la fase de diseño y la tarea de investigación para fallas en servicio, envejecimiento estructural y acciones correctivas. [3]

4.2 Causas de Fallo

Aunque las causas del fallo de un material pueden ser muy diversas, todas están ligadas en cierta medida al error humano, estas se pueden resumir principalmente a siete, fallas por diseño, por selección inadecuada del material, por un tratamiento térmico defectuoso, por una manufactura defectuosa del material, por un mecanizado defectuoso, montaje defectuoso y operación y mantenimiento deficientes.

Defecto de Diseño

Las deficiencias en el diseño son características inaceptables en un producto o sistema, son resultado del proceso y concepción como tal del diseño. Dichos errores abarcan desde el concepto original (idea), la configuración general del diseño y la selección de materiales y procesos de fabricación. Para analizar los factores del proceso de diseño que contribuyó a un fallo de ingeniería, es necesario revisar las fases del proceso de diseño en el contexto del historial original del proyecto, su gestión, las presiones comerciales predominantes y los factores externos de influencia. Al comenzar con el componente fallido y retroceder a lo largo de su historia, recopilando evidencias sobre cómo fue diseñado, desarrollado y producido, a menudo es posible identificar y caracterizar las debilidades que se convirtieron en factores que contribuyeron al fracaso [1] [11][17]

Se presentan algunas posibles causas de fallo debido a mal diseño:

Subestimación de la tensión de servicio

- *Baja Capacidad*
- *Sobre capacidad*
- *Proposiciones físicas Incorrectas*
- *Condiciones físicas incorrectas (temperatura, presión, etc.).*
- *Rodamientos Inadecuados.*
- *Acoplamientos Incorrectos*

Inadecuada elección del material

- *Corrosión y o erosión*
- *Desgaste Rápido*
- *Fatiga*
- *Fuerza Excesiva*
- *Inadecuada elección de tratamiento térmico*

Insuficiencia de instrumentación.

Error de control electrónico.

Geometría Indeseable

- *Concentradores de Esfuerzo*
- *Radios Inadecuados en las Esquinas*
- *Falta de acceso para inspección*
- *Componentes Difíciles de Fabricar*

Defecto por Manufactura

La fabricación de componentes mecánicos se refiere al proceso de creación de un producto con documentación técnica y materias primas, generalmente realizado en una fábrica. Los defectos relacionados a la manufactura pueden estar sujetos a una serie de acumulación de errores desde el trabajo hecho en la fundición, tratamiento térmico, mecanizado y soldadura, cada uno de estos ítems tiene un estudio propio y conlleva un análisis más profundo de todos los defectos que se puedan presentar en su ejecución. Todos los inconvenientes que se presenten en la manufactura logran ser controlados con mejores procesos de verificación de calidad en la línea de producción o fuera de esta, para cada una de dichas actividades, siempre y cuando se tenga un plan de acción de control en el proceso de creación del producto [15]. Se presentan a continuación algunas posibles causas de defectos en la manufactura del producto:

Material

- *Confusión de Materiales*
- *Mala Calidad*
- *No conformidad con Especificaciones*
- *Fases Indeseables*
- *Inclusiones No Metálicas*

Fundición

- *Porosidad*
- *Inclusiones*
- *Segregación*

Piezas Forjadas

- *Pliegues*
- *Fisuras*
- *Líneas de Flujo Desfavorable*

Soldadura

- *Falta de Fusión*
- *Fisuras Frágiles en zonas Afectadas por el calor (HAZ).*
- *HAZ sensibilizado*
- *Figuración por esfuerzos residuales*
- *Inclusiones de escoria*
- *Caracterización de la zona de fusión en el punto final.*
- *Contorno del metal de relleno fuera de especificación.*
- *Grietas en caliente.*
- *Fisuras a bajas temperaturas de exposición.*
- *Fragilidad del hidrógeno debido a la contaminación por humedad.*

Proceso de eliminación de metales

- *Acabado superficial pobre.*
- *Grietas debido a mecanizado abusivo.*
- *Daño micro estructural por herramientas*

- *Grinding burn (daño térmico a la pieza de trabajo durante el rectificado).*
- *Fisuras residuales por sobrecalentamiento.*
- *Ataque intergranular por mecanizado electrónico.*

Tratamiento térmico

- *Crecimiento del grano*
- *Trasformación del grano Incompleta*
- *Retirar las gritas*
- *Decarburación*
- *Martensita no templada*
- *Temblo de fragilidad y condiciones similares de fragilización.*
- *Microestructura estructura sensibilizada.*
- *Inhomogeneidades en la microestructura*
- *Perdida de propiedades debido al sobrecalentamiento durante el horneado posterior.*

Tratamiento superficial /acabado

- *Limpieza inadecuada*
- *Corrosión debido a una limpieza inadecuada antes de pintar.*
- *Ataque intergranular o fragilización por hidrogeno debido a la limpieza ácida.*
- *Recubrimiento inadecuado.*
- *Post tratamiento inadecuado.*
- *Fragilidad del hidrogeno debida a la galvanoplastia.*
- *Corrosión por estrés por lixiviación del núcleo de autoclave caustico de fundición.*
-

Defectos de Montaje

Los defectos de montaje, están relacionados a posibles fallas en la elaboración de instalaciones donde las piezas, maquinas o sistemas ejecutaran sus correspondientes funciones. Estas fallas pueden ser del tipo obra civil, montaje eléctrico, hidráulico, neumático, desagüe etc, generalmente debido a una incorrecta planeación y ejecución de dichas tareas. Los ingenieros de proyectos encargados de realizar los montajes tienen que garantizar que la puesta en marcha sea correcta, de no ser así surgirán complicadas situaciones en las cuales las pérdidas de tiempo y dinero sean factores importantes en la ejecución del montaje [23][26]. Se presentan a continuación algunos errores en montajes:

Ajuste Inadecuado

Tolerancias Incorrectas

Partes Omitidas

Partes Erróneas

Empernado Inadecuado

Piezas / tornillos no apretados

Mal alineamiento

Contacto inadecuado del cojinete

Pruebas inadecuadas

Malas conexiones

Controles desactivados o no puestos en servicio.

Pobre mano de obra

Cimientos

- *Asentamiento*
- *Datos de suelo insatisfactorios.*
- *Rejuntado inadecuado o insuficiente.*
- *Rejuntado inadecuado o insuficiente.*
- *Desequilibrio.*

Tubería

- *Desalineación*
- *Limpieza inadecuada*
- *Drenaje insuficiente de líquidos*
- *Tubería de menor Tamaño*
- *Apoyo Inadecuado*

Almacenamiento

- *Sistema de aceite no limpio*
- *Drenaje inadecuado*
- *Revestimiento protector no aplicado*
- *Recubrimiento incorrecto utilizado*
- *Equipo no limpiado*
- *Protección Insuficiente*
- *Corrosión por sal*
- *Corrosión por lluvia o por humedad*
- *Embalaje ineficiente*
- *Contaminación por suciedad*
- *Daño de carga*
- *Daño en el transporte*
- *Soportes insuficientes*
- *Daños por descargas*

Mantenimiento Inadecuado

Los errores de mantenimiento son uno de los problemas más comunes a la hora de hablar de fallas, es una problemática que se presenta de las formas más comunes en cualquier tipo de industria, generalmente vinculadas a prácticas no apropiadas o inexistentes de mantenimiento. Desde los años 80 se ha implementado la metodología de RCM (Mantenimiento basado en confiabilidad, por sus siglas en ingles), usada por primera vez en la aviación estadounidense y adoptada por las industrias de todo el mundo con el transcurso del tiempo ,RCM plantea metodologías para el desarrollo de mantenimientos y procesos de mejora en la calidad de los productos o servicios que garantice a la maquinaria a intervenir con esta práctica, disminución en los tiempos de manutención, disminución de fallas funcionales y paradas precipitadas de producción debido a fallos. RCM es una completa metodología que reduce los fallos debido al funcionamiento prolongado de componentes mecánico [7][19]. Estas son algunas de las fallas más comunes cuando no se tiene un programa de mantenimiento:

- ✓ *Cualificación de mano de obra*
- ✓ *Reemplazo incorrecto*
- ✓ *Herramientas equivocadas*
- ✓ *Concesiones excesivas*
- ✓ *Inspecciones inadecuadas*
- ✓ *Alteraciones*
- ✓ *Choque*
 - *Térmico*
 - *Mecánico*
 - *Inicio Incorrecto*
- ✓ *Mantenimiento preventivo*
 - *Pospuesto*
 - *Programa demasiado largo*
- ✓ *Inspección Incorrecta*
 - *Desviación de las tolerancias aprobadas*
 - *Desviación de las normas de aceptación*
 - *Técnicas incorrectas*
 - *No horarios de inspección y calibración de herramientas.*
 - *Poca accesibilidad*
- ✓ *Lubricación*
 - *Suciedad en el aceite*
 - *Aceite insuficiente*
 - *Lubricante incorrecto*
 - *Agua en el lubricante*
 - *Fallo de la bomba de Aceite*
 - *Baja presión de aceite*
 - *Líneas conectadas*
 - *Filtración inadecuada*
 - *Aceite contaminado*
- ✓ *Efectos Ambientales*
 - *Varios tipos de corrosión química*
 - *Corrosión baja tensión*
 - *Fatiga por corrosión*
 - *Erosión*

Anomalías de Servicio y Abusos

Las anomalías de servicio y abuso son generalmente representadas por toda aquella acción que involucre el mal uso por parte de los operarios de los componentes. Son acciones que conllevan una sobrecarga o deficiencia en las funciones para las cuales han sido diseñadas las piezas, maquinas o sistemas. El desconocimiento o ignorancia en el manejo y uso de las instrucciones consigue ser la causa raíz de los fallos, para ello siempre es conveniente que los operarios sean personal capacitado y entrenado en dichas funciones. Las responsabilidades de estas personas en el manejo de las máquinas pueden o no alargar el tiempo de vida útil de los componentes [16][37][40]. Algunas de las causas de fallo debido a estas anomalías son:

- ✓ *Lubricación inadecuada*
- ✓ *Limpieza inadecuada*
- ✓ *No seguimiento a las instrucciones de operación*
 - *Exceso de velocidad*
 - *Sobre carga*
 - *Operadores mal entrenados*
- ✓ *Condiciones de servicio inesperadas*
- ✓ *Temperatura y estrés*
- ✓ *Vibraciones*
- ✓ *Cambios en el entorno*

Sabotaje

El sabotaje ocurre cuando la persona esta consiente del daño que puede traer para la pieza, maquina o sistema, conlleva respectivas acciones legales dependiendo el grado de peligro que genere sus acto [36].

- ✓ *Daño deliberado*
- ✓ *Sabotaje Explosivo*
- ✓ *Daños Mecánicos*

4.3 Modos de Fallo

Los modos de fallo se definen como todos los posibles mecanismos físicos que combinan sus efectos para producir un fallo dentro de un sistema, el cual se somete a la aplicación de cargas únicas o monótonas durante su funcionamiento o no funcionamiento [12][16][23]. Los fallos mecánicos implican una interacción extremadamente compleja entre factores tales como, la carga aplicada, el tiempo de funcionamiento y la exposición al ambiente. Se presentan a continuación los modos de fallo más comunes [11][17][23][40].

1. *Deformación elástica inducida por fuerza y/o por temperatura.*
2. *Limite elástico (Yielding).*
3. *Formación de estrías (Brinnelling).*
4. *Ruptura dúctil.*
5. *Fracturas frágiles*
6. *Fatiga*
 - ✓ *Fatiga de ciclo alto*
 - ✓ *Fatiga de ciclo bajo*
 - ✓ *Fatiga térmica*
 - ✓ *Fatiga superficial*
 - ✓ *Fatiga de impacto*
 - ✓ *Fatiga por corrosión*
 - ✓ *Fatiga por fricción*
7. *Corrosión*
 - ✓ *Ataque químico directo*
 - ✓ *Corrosión galvánica*
 - ✓ *Corrosión por rendija*
 - ✓ *Corrosión por picadura*
 - ✓ *Corrosión intergranular*
 - ✓ *Lixiviación selectiva.*
 - ✓ *Corrosión por erosión*
 - ✓ *Corrosión por cavitación*
 - ✓ *Corrosión biológica*
 - ✓ *Corrosión por estrés*
8. *Desgaste*
 - ✓ *Desgaste adhesivo*
 - ✓ *Desgaste abrasivo*
 - ✓ *Desgaste corrosivo*
 - ✓ *Desgaste por fatiga*
9. *Impacto*
 - ✓ *Fractura por impacto*
 - ✓ *Deformación por impacto*
 - ✓ *Desgaste por impacto*
 - ✓ *Fatiga de impacto*
10. *Temperatura*
 - ✓ *Choque térmico*
 - ✓ *Pandeo*
 - ✓ *Sobrecalentamiento a largo plazo*
 - ✓ *Sobrecalentamiento a corto plazo*
 - ✓ *Relajación térmica*
 - ✓ *Fluencia*
 - ✓ *Pandeo de arrastre*
11. *Ruptura por estrés*
12. *Galling y aprehensión*
13. *Astillamiento*
14. *Daño por radiación*
15. *Corrosión por estrés*
16. *Desgaste de corrosión*
17. *Fatiga por corrosión*
18. *Combinación de fluencia y fatiga*

Se profundizan los modos de falla que fueron encontrados en la pieza mecánica estudiada para esta investigación.

Desgaste

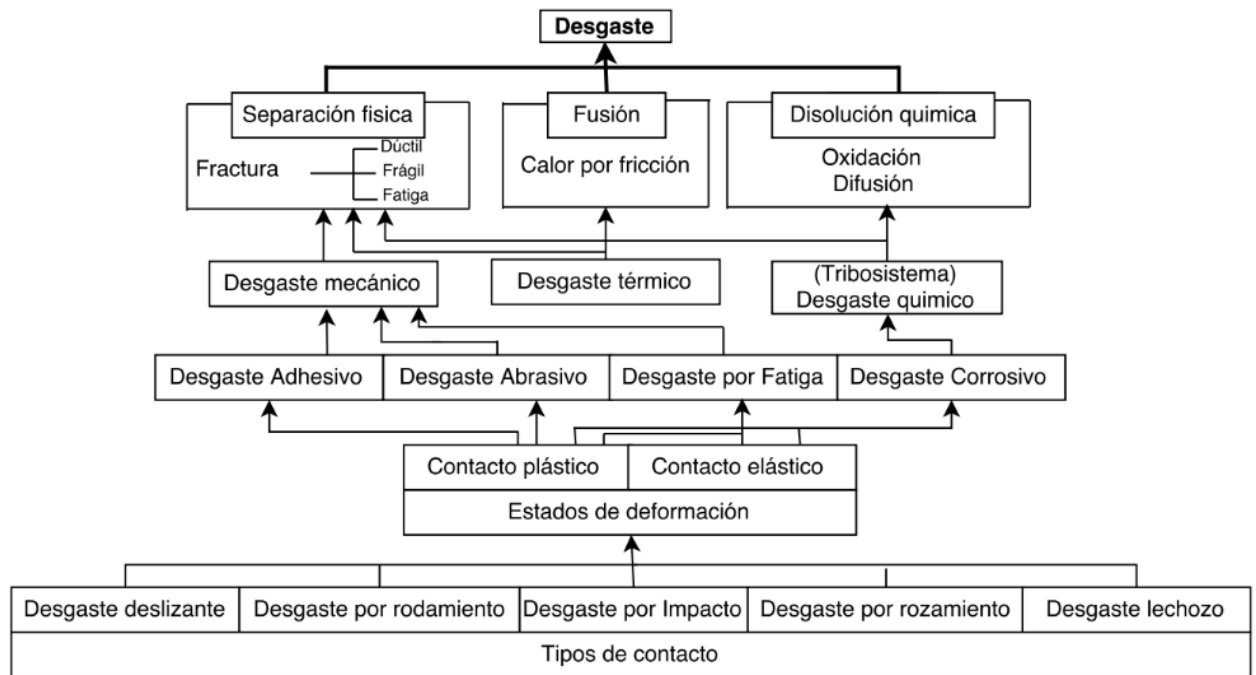


Figura 4-2. Palabras clave descriptivas del desgaste y sus interrelaciones. [1]

El desgaste es el resultado de la eliminación o desplazamiento no deseado de material por separación física debido a micro fracturas, disolución química o por fusión en la interfaz de contacto causada por el roce entre una superficie y un cuerpo o una sustancia que se mueve con relación a el (solido, liquido o gas en contacto), por ende se manifiesta básicamente en la deformación y fractura, estos pasan de una micro escala y continúan hasta el punto que el daño a macro escala este presente, por ello se aprecia cambios de aspecto del perfil de superficie [10] [45]. Por lo general, el desgaste es un tipo previsible de deterioro, el cual es progresivo, ya que aumenta con el uso o a cantidades crecientes de movimiento así como proporciona información del ambiente físico que indujo al fracaso [24][45]. Además, existen varios tipos de desgaste: adhesivo, abrasivo, fatiga y corrosivo las cuales interaccionan con otros conceptos vistos en la Figura 3-2. El modo de desgaste dominante puede cambiar de uno a otro por razones que incluyen cambios en las propiedades del material superficial y respuestas de superficie dinámicas causadas por calentamiento, fricción, formación de película química y desgaste así como con interacciones entre otros modos de fallo como se observa en la Figura 3-4 para el caso del desgaste [10][37].

Desgaste Adhesivo

El desgaste adhesivo es la transferencia de metal de una superficie en contacto hacia otra. Si la interfaz de contacto entre dos superficies bajo contacto plástico tiene suficiente resistencia de adhesión para resistir el deslizamiento relativo, se introduce una gran deformación plástica provocando desprendimientos en la zona de contacto bajo compresión y cizallamiento. Como resultado de una deformación tan grande en la región de contacto, se inicia una grieta y se propaga en el modo de fractura combinada por tracción y cizallamiento. Cuando la grieta alcanza la interfaz de contacto, se forma una partícula de desgaste y se completa la transferencia adhesiva provocando micro soldadura e inmediatamente se separan las dos superficies ver figura 4-3 [10][37][41].

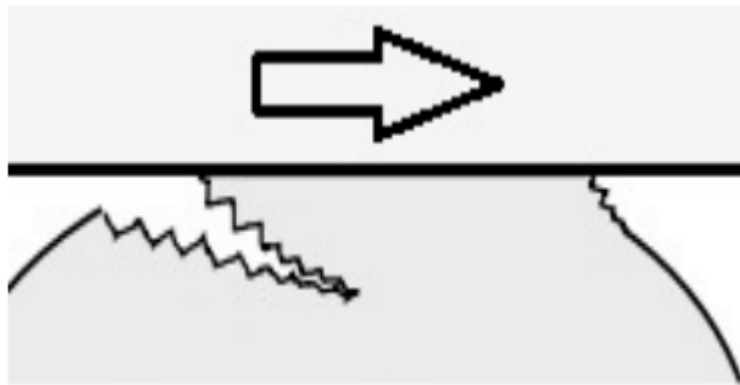


Figura 4-3. Desgaste Adhesivo. [4]

Mecanismo de Falla por Temperaturas Elevadas que Limitan la Vida

El termino fallo por sobrecalentamiento significa un fallo resultante del funcionamiento de un componente a una temperatura superior a la esperada en el diseño. El tiempo expuesto a temperatura es un factor importante, y estos tipos de fallas a menudo se denominan fallas de sobrecalentamiento a corto y largo plazo [54]. Los fallos de temperatura elevada son quizás el tipo más complejo de fallas, ya que todos los modos de fallas mencionados en la sección 4.3 pueden ocurrir a temperaturas elevadas, por lo tanto, estos fallos deben ser examinados y considerados con mucho cuidado porque muchos de los diferentes modos de falla tienden a interactuar tal como se observa en la Figura 4-4 para el caso de la temperatura. Así pues los principales tipos de fallas como consecuencia de temperaturas elevadas son la fluencia, la fatiga de ciclo bajo o de ciclo alto, la fatiga térmica, la sobrecarga y combinaciones de estas modificadas por el medio ambiente [45].

Para el caso de estudio de esta investigación se describe la falla de sobrecalentamiento a corto plazo, es aquella en la que un solo incidente o un pequeño número de incidentes exponen al componente a una temperatura excesivamente alta (cientos de grados por encima de la normal), hasta el punto en que se produce una deformación o rendición. El sobrecalentamiento resulta de condiciones anormales tales como pérdida de flujo de refrigerante y transferencia excesiva de temperatura. En general, los fallos de sobrecalentamiento a corto plazo implican una deformación considerable en forma de alargamiento de metal y reducción en área de pared o sección [47] [49] [53].

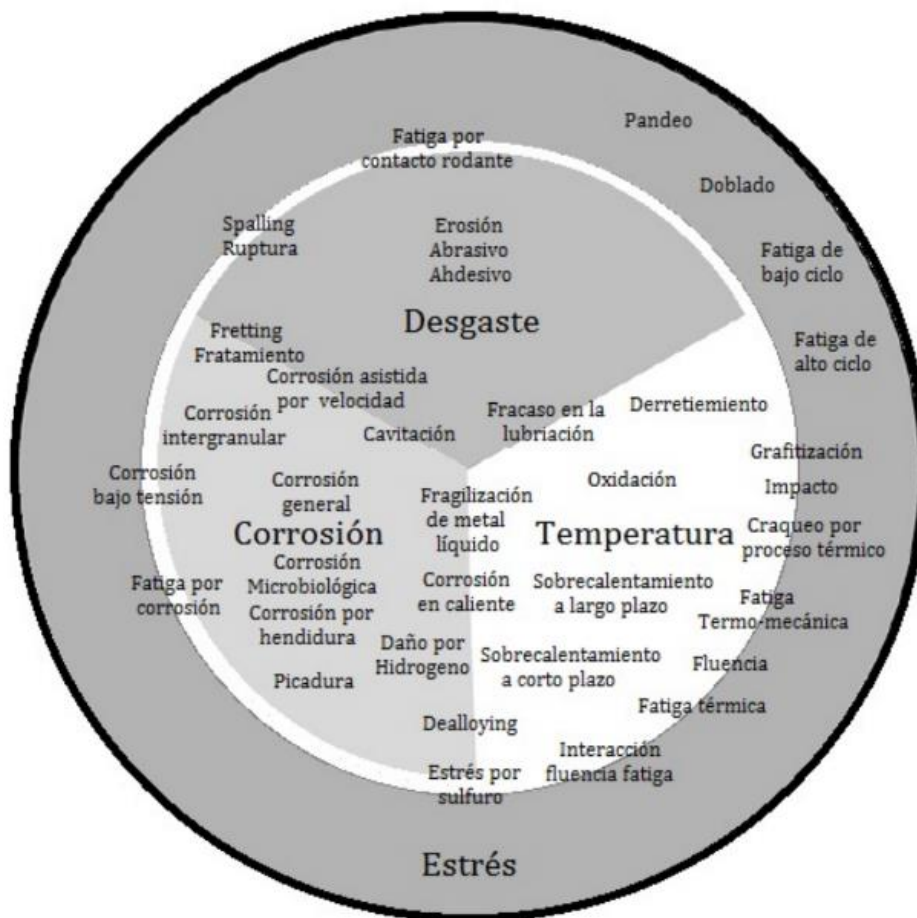


Figura 4-4. Círculo de Fallos. [5]

4.4 Análisis de Falla

Análisis de falla es un proceso crítico que se realiza para definir las raíces físicas de los problemas que han conducido a una pérdida indeseada de funcionalidad. Su complejidad se desarrolla en la aplicación de distintas técnicas de observación, inspección y técnicas de laboratorio así como la aplicación de un sin número de conocimientos en distintas ramas de la ciencia e ingeniería, dándole una perspectiva multidisciplinar de conocimientos [1].

El origen del proceso de análisis de falla se encuentra estrechamente relacionado con el uso del método científico, un modelo investigativo para la creación de conocimiento y resolución de problemas que busca exponer y confirmar teorías de una forma práctica, refutable y comprobable. Usa de forma ordenada una secuencia de pasos encarrilada a encontrar soluciones a los objetivos planteados en el estudio [1][44].

- I. Definir el problema
- II. Proponer una hipótesis
- III. Recopilar datos
- IV. Prueba de la hipótesis
- V. Desarrollar conclusiones

Los modelos de resolución de problemas establecen un proceso continuo de mejoras, donde se resuelve un problema, seguidamente no se detienen allí sino que basado en lo aprendido se buscan soluciones a otros problemas ligados a el problema resuelto tal como se observa en la Figura 4-5, buscando en esto la mejora, es decir, de los fallos se aprende, aunque se dé un paso atrás se dan dos hacia adelante, siempre y cuando se piense en progresar el estudio del análisis de falla da gratos frutos a sus usuarios [1][27].

Los pasos en la resolución de problemas están definidos como [1]:

- *Identificar*: La identificación describe la situación actual del problema, se describen todos los síntomas o indicadores que preceden el fallo, estableciendo la magnitud del impacto en el sistema, máquina, personal, factores económicos, clientes etc.
- *Determinar la causa raíz*: Analizar el problema para identificar las causas.
- *Desarrollar acciones correctivas*: Basado en el paso anterior y conocido las recomendaciones del análisis, se enumeran una serie de soluciones que mitiguen y prevengan la recurrencia del problema, desarrollando un plan de mitigación y nuevas alternativas en pro de sacar provecho al análisis.
- *Validar y verificar las acciones correctivas*: Se prueban las recomendaciones y las acciones correctivas, corroborando la efectividad de estas, es decir chequeando que el problema se ha corregido y la perspectiva de los trabajadores, directivos y clientes sea de satisfacción.
- *Estandarizar*: Incorporar acciones correctivas en el sistema de documentación del sistema de la empresa, organización o industria para prevenir la recurrencia en productos o sistemas similares. Monitoree los cambios para asegurar la efectividad.

Incorporar el uso de los pasos anteriores dará respuesta a [1]:

- I. ¿Cuál es el problema?
- II. ¿Cuál es la causa raíz?
- III. ¿Cuáles son las posibles soluciones?
- IV. ¿Cuál es la mejor solución?

Que en definitiva son las preguntas a las que se le deben dar respuesta cuando se emplea análisis de falla.

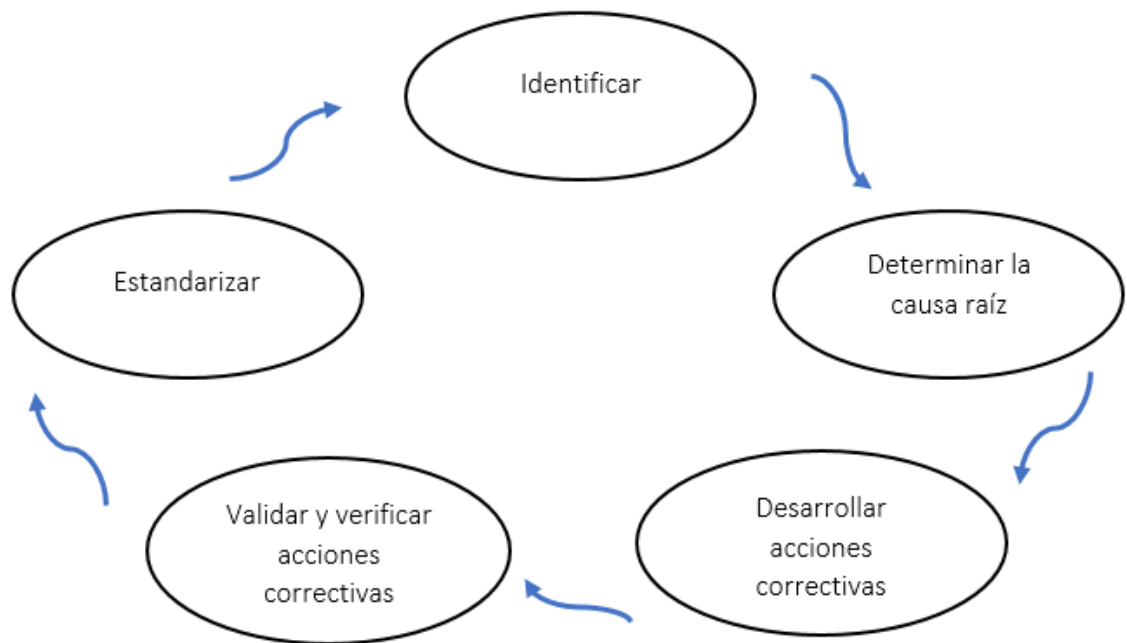


Figura 4-5.Modelo de Resolución de Problemas. [1]

Perfil de Análisis de Falla

El analista de fallas se desenvuelve en un par de roles durante el desarrollo de su trabajo, el primero como Sherlock Holmes, un detective que se enfrenta a distintos casos en los cuales debe examinar y evaluar cuidadosamente todas las pruebas disponibles para luego preparar una hipótesis relatando una cadena de acontecimientos en las cuales se expliquen los hechos del “crimen”. El segundo rol del analista de falla es de forense, pero en lugar de realizar autopsias a una persona que sufrió una muerte no natural, se encarga de trabajar con piezas, máquinas o sistemas que han sufrido un deterioro antinatural o prematuro. El analista debe mantener la mente abierta al examinar y analizar la evidencia para fomentar una perspectiva clara e imparcial de la falla, siempre estar dispuestos a obtener ayuda con expertos en otras disciplinas integrando conocimientos que fomente una comprensión cuantitativa de los factores de carga e información de antecedentes sobre diseño, fabricación e historial de servicio.[1][45].

Objetivo del Análisis de Falla

Dependiendo las circunstancias del evento, el ingeniero determinara qué camino debe seguir su investigación esta dependería del momento de vida en el que se encuentre el componente, así como se explica a continuación. El primer objetivo de la realización de un análisis de falla, debe ir encaminado en la determinación de fallos en Prototipos, donde el diseñador pone a prueba su creación y determina que aspectos debe mejorar o por el contrario, el componente aplica a todos los requerimientos y especificaciones de diseño, vale aclarar que la pieza mecánica a un no está disponible para el consumidor y se hace todo lo posible para que funcione sin ningún problema. Como segundo objetivo se dispone el análisis de falla en la Mejora de un producto el cual ya está en el mercado pero por alguna razón se debe mejorar, este puede estar generando costos adicionales al usuario o al fabricante. La tercera opción para valerse de dicho análisis es en el momento que la pieza mecánica ha fallado y se deba realizar una asignación de responsabilidades en cuestiones legales como reparación de daños financieros, lesiones físicas o inclusive muertes, diagnosticar el fallo decidirá qué acciones se tomarán por algún tipo de negligencia de las partes involucradas. El último objetivo que aborda el análisis de falla es la prevención de recurrencias, en esta situación se busca encontrar el o los fallos, hallar la respuesta y prevenir la ocurrencia del mismo fallo. Este proyecto se inclina al último objetivo expuesto, pero el procedimiento aplicado funciona para cada una de las finalidades nombradas [50][52].

4.5 Metodología de Análisis de Falla

El desarrollo de un correcto análisis de falla ha venido mejorando a través de los años, gracias a la experiencia que se ha ganado por parte de los ingenieros y científicos especializados en esta disciplina, tratando con los más complejos casos de estudio. Es importante que el desarrollo de una metodología de trabajo estructurada para cumplir los objetivos y alcances del análisis, contemple todas las posibles herramientas para la búsqueda de una causa raíz de fallo, abarcando conocimientos multidisciplinarios en distintas áreas de la ingeniería apoyándose de la observación, inspección, ensayos de laboratorio, cálculos y experiencia. Los autores contemplan en sus libros determinadas cantidades de “pasos” a seguir para un acertado desenvolvimiento en la práctica de análisis de falla, dichos autores difieren de otros en determinados pasos, pero como anteriormente se menciona, se deben usar distintas herramientas que cumplan el objetivo del estudio. Cada investigación es distinta por ende cada caso tendrá un alcance distinto, por ello obviar alguno de los pasos y variar el orden de ejecución en la práctica es correcto siempre y cuando la naturaleza del estudio lo permita. A continuación se presentan dichos pasos para un correcto análisis de falla, esta metodología ha sido empleada y verificada por estándares internacionales, es usada por The Bangalore National Aerospace Laboratories (NAL) Failure Analysis Centre, pioneros en el desarrollo de análisis de falla en componentes mecánicos, así como parte importante en sentar las bases de esta metodología [11][14][17][18][23][30][36].

Pasos para realizar un análisis de falla:

- | | |
|---|---|
| 1. Recopilación de información. | 7. Examen metalográfico. |
| 2. Inspección visual. | 8. Consulta con expertos. |
| 3. Ensayos no destructivos. | 9. Informe de investigación. |
| 4. Selección, identificación y/o limpieza de evidencia crítica. | 10. Seguimiento de las recomendaciones. |
| 5. Examen y análisis macroscópico. | 11. Preservar evidencia. |
| 6. Ensayos de dureza | |

Esta metodología que incluye una gran cantidad de pasos y herramientas en la búsqueda de causas raíces de fallo, se ve limitada por los recursos que pueda o no

disponer el analista, algunas de las técnicas mencionadas suelen ser muy costosas, complejas o no contar con la tecnología. Por ello es importante aclarar los alcances y limitaciones que se puedan tener en la investigación. Justificado en lo anterior se expone con algo más de profundidad algunas de las técnicas o posibles pasos de esta metodología que se emplearan en la investigación de análisis de fallo y causa raíz de los 3 componentes mecánicos debido a las limitaciones mencionadas.

Inspección Visual

El examen visual o prueba (VT) es un método de inspección simple, no destructivo, accesible y de bajo costo que permite detectar discontinuidades superficiales en los componentes a estudiar [8][20][36]. Para ello se emplea el ojo humano que sin ayuda posee una profundidad admirable de enfoque y la capacidad de examinar grandes áreas rápidamente, detectando cambios superficiales visibles en el espectro de longitud de onda asequible para este órgano del cuerpo humano. Se recomienda que el ojo este a menos de 6 pulgadas (150 mm) de la superficie a examinar y en un ángulo no inferior a 30° respecto a la superficie a examinar como se observa en la Figura 4-6 [13][25].

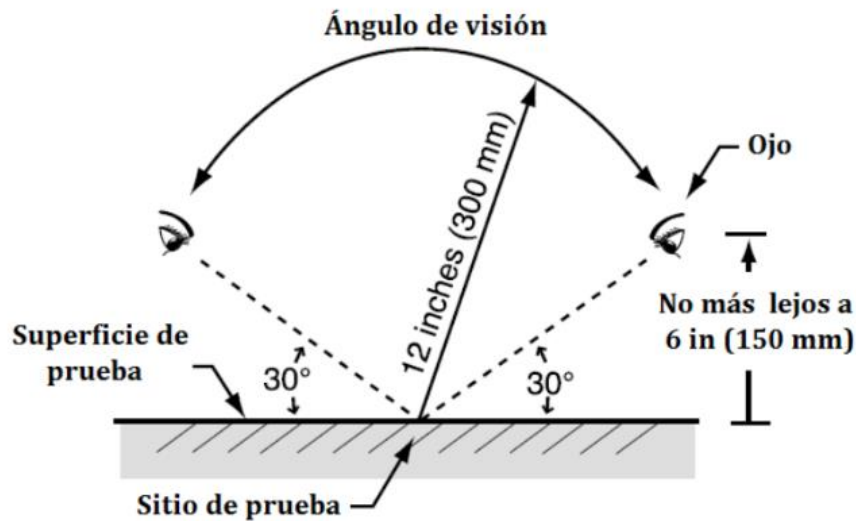


Figura 4-6. Mínimo Ángulo para una Inspección Visual. [6]

El chequeo visual revela detalles tales como [20][36][45]:

- Localización de discontinuidad.
- Cambios de color de la superficie.
- Tipo de fractura.
- Origen de la fractura.
- Presencia de recubrimientos superficiales.
- Soldadura.
- Residuos adheridos.
- Presencia de desechos externos o productos de corrosión.
- Escamas o fragilidad por hidrogeno.
- Decoloración.
- Presencia de marcas de desgaste en las proximidades de la fractura.
- Deformación plástica anterior a la fractura.
- Dirección del agrietamiento
- Presencia de grietas secundarias.
- Fatiga.
- Inclusiones.
- Marcas de Chevron.
- Marcas de playa.
- Cambios dimensionales en el componente.
- Cambios dimensionales en el componente.
- Cambios dimensionales en el componente.
- Calidad de mano de obra en la fabricación.

El examen visual se realiza en las siguientes etapas [13, 17]:

- a) Las piezas que han fallado, incluidos todos sus fragmentos, se someten a un examen exhaustivo del estado del cual se recibe, es decir, antes de proceder a cualquier limpieza. Con frecuencia, el suelo y los desechos encontrados en la pieza proporcionan pruebas útiles para determinar la causa del fallo o determinando la secuencia de eventos que conducen al fallo.
- b) La pieza defectuosa se limpia a fondo (si se considera necesario) con disolventes no corrosivos y se somete a un nuevo examen visual.
- c) Inspección visual.
- d) Todas las discontinuidades encontradas deben ser registradas y documentadas ya sea por escrito o evidencia fotográfica.
- e) Se debe dar la localización del defecto con respecto algún punto de referencia de la pieza.
- f) Se debe describir parámetros del defecto, su gravedad, frecuencia y área cubierta (es decir, extensión del daño).
- g) Detectar defectos relacionados cerca a las discontinuidades que puede o no haber iniciado o contribuido, directa o indirectamente a la falla.

En la figura 4-7 se mencionan algunos modos de fallo identificables a partir de la inspección visual con algunas características posibles de detectar, también de lo que se puede observar en una inspección microscópica [46][51].

Método	Sobrecarga dúctil	Sobrecarga frágil	Fatiga	Corrosión	Desgaste	Fluencia
Inspección visual, 1 a 50 X en la superficie de fractura	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión en la dirección coherente con las cargas aplicadas • Fractura opaca y fibrosa • Bordes cortantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco o nada de distorsión • Fractura plana • Textura brillante o gruesa, cristalina, granulada • Rayones o marcas de Chevron apuntan al origen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zona progresiva plana con marcas de playa • Zona de sobrecarga consistente con la dirección de carga aplicada • Marcas de Ratchet donde los orígenes se unen 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste general, rugosidad, perforación o excavación de zanja • El daño por estrés-corrosión e hidrógeno pueden crear múltiples grietas que parecen quebradizas 	<ul style="list-style-type: none"> • Corte, abrasión, pulido o erosión • Galling en la dirección del movimiento • Áreas rugosas con restos de polvo compactado (fretting) • Transiciones graduales suaves en la zona de desgaste 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples fisuras parciales quebradizas • La superficie externa y las fisuras internas contienen recubrimientos a escala de la reacción • Fractura después de un cambio dimensional limitado
Inspección SEM 20 a 10.000 X (superficie de fractura).	<ul style="list-style-type: none"> • Microhuecos (hoyuelos) alargados en la dirección de carga. • Fisuras simples sin ramificación. • Aparición de superficies lisas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hendidura o fractura intergranular. • El Área de origen puede contener un concentrador de imperfección o tensión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zona progresiva: aspecto desgastado, plano, puede mostrar estrías en aumentos por encima de 500 X. • Zona de sobrecarga: puede ser dúctil o frágil. 	<ul style="list-style-type: none"> • El camino de penetración puede ser irregular, intergranular o una fase selectiva atacada. • EDS (Espectroscopia de Energía Dispersiva) puede ayudar a identificar corroyente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los desechos de desgaste y/o abrasivos se pueden caracterizar en cuanto a morfología y composición. • La fatiga por contacto aparece como el desgaste en las primeras etapas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples fisuras intergranulares cubiertas con una escala de reacción. • Las caras de grano pueden mostrar porosidad.

Figura 4-7.Tabla de Identificación de Modos de Fallo a Partir de Inspección Visual y con la Ayuda de un Microscopio. [2]

Ensayo de Dureza

Los ensayos o pruebas de dureza son procedimientos cuyo objetivo es determinar el grado de dureza de algún material, dicho resultado se emplea en una comparativa entre el mismo material u otros, estos ensayos presentan ventajas tales como sencillez, rapidez de ejecución y en algunos casos no son destructivos [21][32]. Se entiende por dureza como una propiedad de los materiales no fundamental que expresa la resistencia a la penetración local permanente o al rasgado, al mecanizado o la abrasión [7][18]. La resistencia a la penetración localizada, o dureza de indentación, es ampliamente utilizada industrialmente como medida de dureza e indirectamente como un indicador de otras propiedades deseadas en un producto manufacturado [34]. Se encuentran disponibles distintos tipos de ensayos de dureza, dentro de los más importantes y comunes de aplicación son: Método Rockwell, Brinell, Vicker y Knoop.

Método Rockwell

En el método Rockwell de ensayo de dureza, se determina la profundidad de penetración de un indentador bajo ciertas condiciones arbitrarias de ensayo. El indentador puede ser una bola de acero de algún diámetro especificado o un diamante cónico con punta esférica de 120° y radio en la punta de 0,2 mm, llamado "Brale". Se aplica primero una carga menor o precarga de 10 kg, lo que causa una penetración inicial y logra mantener el indentador en su lugar. Bajo esta condición, el dial se pone a cero y se aplica la carga principal. Los valores de estos últimos son 60, 100 o 150 kg. Al retirar la carga principal, la lectura se realiza mientras la carga menor esta todavía encendida como se observa en la Figura 4-8 [22].

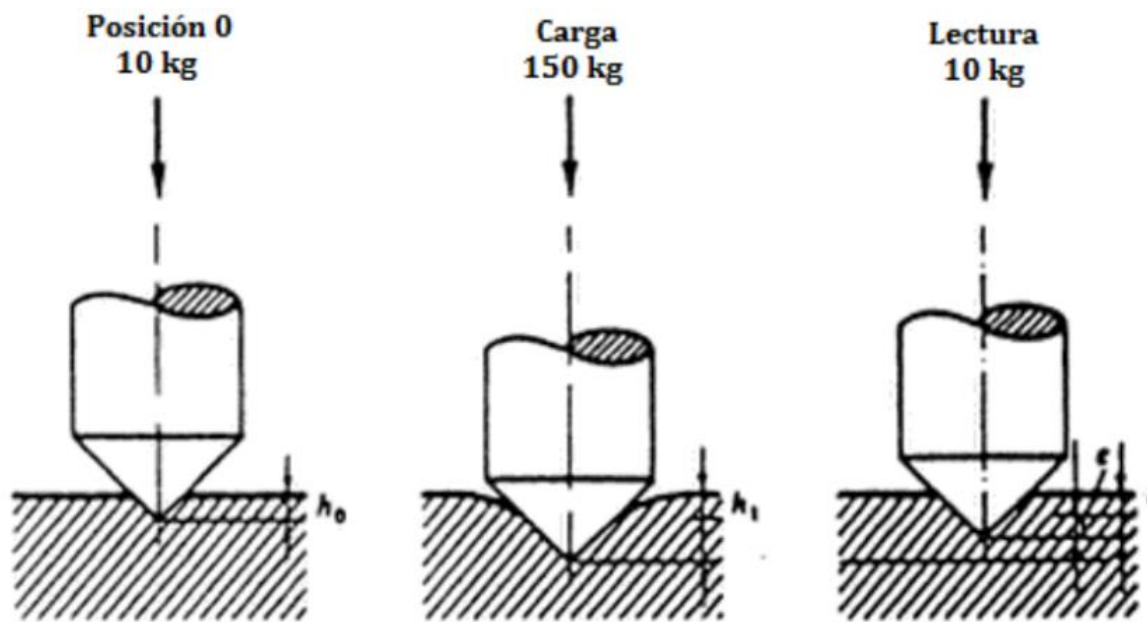


Figura 4-8. Profundidad de Penetración por el Método Rockwell [32]

Examen Metalográfico

Metalografía es la disciplina científica que examina y determina la constitución y la estructura subyacente de (o las relaciones espaciales entre) los constituyentes en metales, aleaciones y materiales. El examen estructural puede realizarse en una amplia gama de escalas de longitud o niveles de ampliación, que van desde un examen visual o de baja ampliación (aprox 20 X) a un aumento de mas de 1.000.000 X con microscopios electrónicos, algunos detalles de fallas se describen en la figura 3-7 [1] [46]. La metalografía es una parte vital de una investigación de análisis de fallas pudiendo ser ejecutadas en escalas macro y micro.

Puede examinar la morfología de la grieta y su relación con la microestructura presente. Ayuda a determinar el historial térmico de un componente o una región de una pieza, revela si el trabajo de endurecimiento está presente, imperfecciones superficiales, inclusiones, recalentamiento, descarburación, recolección de carbono, tratamiento térmico inadecuado, martensita blanca no templada, corrosión intergranular, oxidación y detalles micro estructurales, todo ello ayuda al analista en la determinación de la causa raíz de fallo [13, 14, 17]. Debido a la naturaleza de este examen debe considerarse como uno de los procedimientos finales para la determinación de la causa raíz ya que implica la destrucción de evidencia [1].

Realizada las fotografías de microestructura del material, el siguiente paso es su interpretación. Dicha Interpretación de las microestructuras es una piedra angular de la metalografía tal como la adecuada preparación del espécimen. Al igual que la preparación de muestras, la interpretación de las microestructuras es una mezcla de arte, experiencia y ciencia. El arte de interpretar se basa en la experiencia y en el gran cuerpo de imágenes grabadas capturadas e interpretadas por muchos metalógrafos a lo largo de los años. Sin embargo, es claramente imposible llegar a ser un experto en cada microestructura posible de cada aleación posible. El uso de las micrografías existentes como herramienta de interpretación requiere una comprensión de las condiciones de la aleación y del proceso, que pueden no estar disponibles exactamente en las mismas condiciones que el espécimen de interés [1].

Informe de Investigación

Los informes de análisis de fallas son, por supuesto, un medio de comunicación tangible de forma escrita, cuyo propósito es informar a la gerencia, cliente, profesor, par o a quien le interese, los hallazgos encontrados en la investigación. Un informe formal de análisis de fallas es una herramienta de enseñanza para el investigador hacia cualquier interesado respecto a su estudio [11]. Para una comunicación eficaz de los resultados del análisis de fallos, la documentación es extremadamente importante. El informe debe ser claro y contener la lógica detrás de las conclusiones. Se incluyen secciones que abarcan la siguiente información [1][36]:

- ✓ Descripción del componente fallido.
- ✓ Antecedentes.
- ✓ Examen visual de las características físicas generales.
- ✓ Investigaciones de laboratorio incluyendo pruebas metalúrgicas, mecánicas, químicas y otras y sus resultados.
- ✓ Anomalías, si las hay.
- ✓ Discusión del mecanismo o posible mecanismo de falla y secuencia de eventos (RCA).
- ✓ Conclusiones y recomendaciones para la prevención de la recurrencia de tales fallos.

- ✓ Referencias bibliográficas relevantes.

- ✓ Resumen.

5. FUNDAMENTO- Análisis Causa Raíz

El análisis de la causa raíz (RCA por sus siglas en inglés) es un estudio investigativo el cual pretende identificar y resolver problemas que afectan el rendimiento general o particular de una planta o proceso industrial. RCA es simplemente una herramienta diseñada para ayudar a los investigadores de incidentes a describir lo sucedido durante un fallo en particular, determinar cómo paso y entender por qué sucedió [1][29][35].

El estudio de la evidencia física por si sola (realizado con análisis de falla) es posible que no logre el objetivo de una investigación de fallos. El alcance de un análisis de fallas puede, pero no necesariamente, conducir a una causa raíz corregible del fallo por ello RCA emplea una secuencia lógica de pasos donde el investigador aísla los hechos que rodean un evento o un fracaso. Una vez que el problema ha sido totalmente definido, el análisis determina sistemáticamente el mejor curso de acción donde resolver el evento logrando determinar la raíz de fallo y asegurando posibles acciones correctivas [1][28].

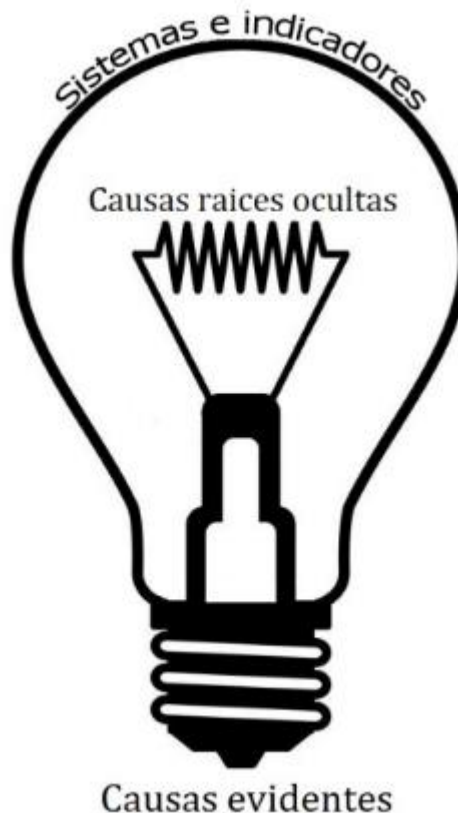


Figura 5-1. Analogía del Análisis de Falla.[4]

En la Figura 5-1 se observa la analogía que soporta la idea inicial en la búsqueda de una causa raíz de fallos, comparándola con los componentes de una bombilla. Los sistemas e indicadores representados por el Bulbo de vidrio, son todos aquellos factores visibles en la falla como tal, es decir todo lo que puede haber producido o ya produjo un daño. Las causas evidentes representadas por el casquillo, son todos aquellos factores de fallo indiscutibles, son el soporte de las causas raíz, posibles de detectar a simple vista o con un examen macroscópico y dan al investigador pautas para seguir las acciones forenses. Por ultimo las causas raíz ocultas representadas por el filamento, son el origen del fallo como tal y es a donde toda investigación de fallos y RCA debe culminar, son todos los posibles factores que llegaron a producir el fallo y es allí en estas causas donde se deben implementar acciones correctivas. [38][42]

5.1 Métodos Gráficos para RCA

Una representación visual de una RCA es más fácil de entender que una larga descripción narrativa. Se han desarrollado muchos métodos gráficos que facilitan la organización lógica de la información como una ayuda en la realización de un RCA [2]. La siguiente numeración presentan las técnicas disponibles para encontrar una causa raíz, seguidamente se explican tres de estos métodos que sean empleados en esta investigación [43].

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. Reunión creativa. | 7. FMEA. |
| 2. Histograma. | 8. 5 Whys. |
| 3. Diagrama de flujo. | 9. Análisis de tendencia. |
| 4. Análisis de campo de fuerza. | 10. Análisis de árbol de fallos. |
| 5. Análisis de Pareto. | 11. Diagrama de causa y efecto
(espina de pescado). |
| 6. Técnica de grupo nominal. | |

Análisis de Causa y Efecto

El análisis de causa y efecto es un enfoque gráfico para el análisis de fallas. Esto también se conoce como análisis de espina de pescado, un nombre derivado del patrón en forma de pez utilizado para trazar la relación entre varios factores que contribuyen a un evento específico intentando encontrar una causa raíz. Puede construirse de la siguiente manera [2, 28].

- ✓ Describa claramente el fallo en el lado derecho del diagrama.
- ✓ Identificar las principales categorías de causas como ramas que convergen en el fracaso.
- ✓ Haga una lluvia de ideas y enumere todas las causas en cada rama.
- ✓ Analizar los datos hasta que se identifiquen las causas raíz.

En la figura 4-2 se detalla un diagrama de espina de pescado con las causas y efectos posibles, tratando de determinar una causa raíz debido a la presencia de corrosión en algún sistema, máquina o pieza.

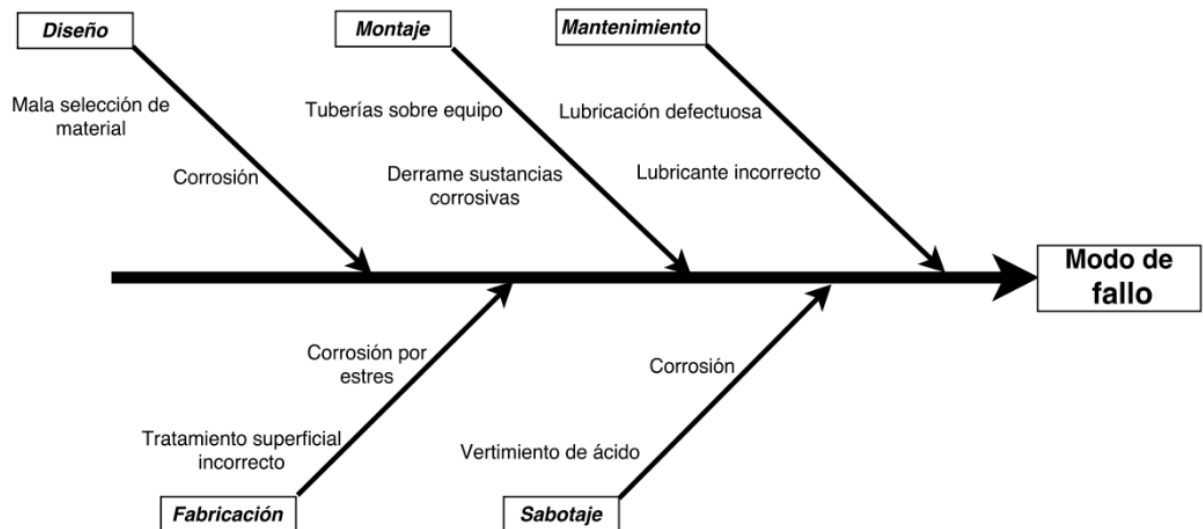


Figura 5-2. Ejemplo Diagrama de Espina de pescado. [1]

5.2 The 5-Whys

The 5-Whys o Los cinco por qué, es una técnica implementada por primera vez por Sakichi Toyoda para Toyota Industries Corporation, donde el usuario usando este simple método logra concluir a niveles más profundos la identificación de la causa raíz a determinado problema. El objetivo general es preguntar por qué? después de cada causa que se ha identificado hasta que se reconoce las causas raíces verdaderas. Hay tres elementos claves para el uso efectivo de la técnica: (1) declaraciones precisas y completas del problema, (2) honestidad completa en responder a las preguntas, (3) la determinación de llegar al fondo de los problemas y resolverlos. Generalmente se usan cinco niveles de pregunta, pero el método permite usar más o menos cuestionamientos [1] [39]. En la Figura 5-3 se aprecia de manera jerárquica como se determina una causa raíz de fallo. [48]

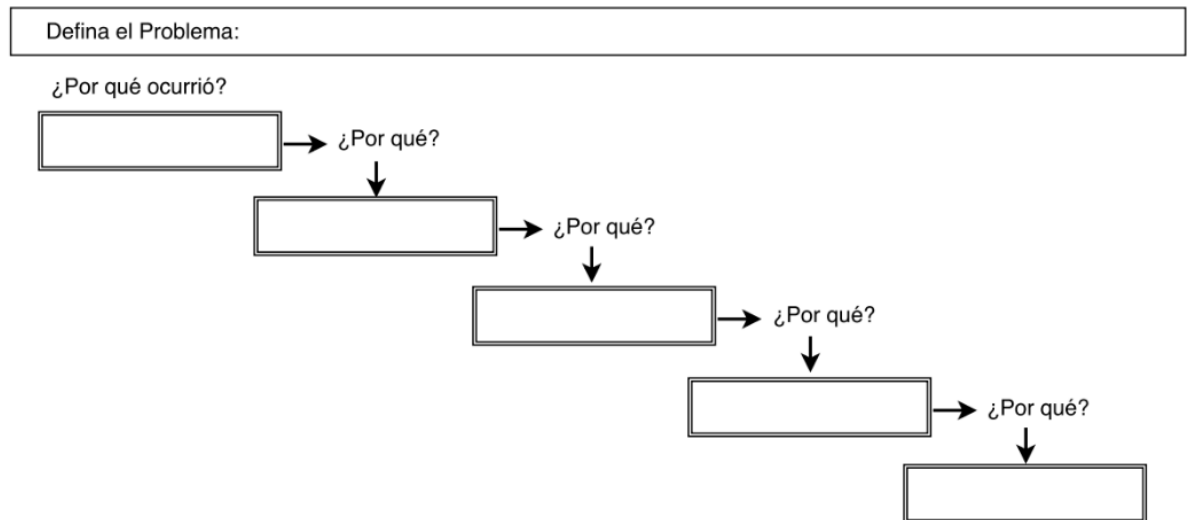


Figura 5-3. Esquema jerárquico de The 5-Whys.[48]

6. INSPECCIÓN VISUAL DEL COMPONENTE

El primer paso para el desarrollo de análisis de falla a el componente mecánico “Valve Tappet” del motor TWIN WASP SIC3G PRATT & WHITNEY , es la inspección visual.

A continuación se presenta el componente “Valve Tappet” *Foto 1.1*, se describe el mecanismo de funcionamiento, al igual que su ubicación dentro del motor ” *Figura 6.1*, tomado del manual de mantenimiento y manual de partes del motor TWIN WASP SIC3G PRATT & WHITNEY . Se hace una inspección visual basando en las recomendaciones hechas en la subsección *Inspección visual del capítulo 4.5* Metodología del análisis de falla. También se describe el procedimiento llevado a cabo por medio del método de tintas penetrantes.

Las fotografías por parte de la empresa ISOTEC, la cual colaboró en la obtención del componente, al mismo tiempo, aportó sus conocimientos y experiencia en la detección de fallo en componentes mecánicos por medio de tintas penetrantes, *Foto 6.1, Foto (6.4)*.Y gracias a su valiosa ayuda se logró determinar con certeza y veracidad donde existía una falla en el componente .Ya que como es bien sabido en estos componentes es muy complicado determinar un fallo solo por una simple inspección visual.



Foto 6.1. *Componente Mecánico Valve Tappet.* [14]

6.1. Mecanismo de Valve Tappet

El mecanismo de funcionamiento de Valve Tappet están compuestos de un casquillo guía, rodillos de empuje, varillas de empuje y balancines, para operar las válvulas de cilindro las cuales cierran y abren respectivamente. Cada rodillo de empuje está unido al extremo bifurcado interior de un roscado y gira sobre la unión denominada pin plateado. Los empujadores y rodillos transmitan el desplazamiento del lóbulo de levas a las varillas de empuje a medida que cada leva gira sobre su respectivo rodamiento. Se ensambla un casquillo, para acoplar la varilla de empuje. Las valve Tappet esta perforado para facilitar la transferencia de aceite desde el colector de aceite que abastece a las varillas de empuje.

Las varillas de empuje transmiten el movimiento de la válvula al balancín y transportan el aceite desde los empujadores hacia los balancines. El aceite lubrica todo el sistema llegando hasta los balancines siendo un flujo constante a medida que el sistema esté en operación.

Las guías superiores ranuradas permiten que el aceite drene en el cárter. Las empaquetaduras del refrigerante y los anillos de empaquetadura del mecanismo están instaladas de forma tal que generen un sello hermético y sirven como restricciones contra fugas de aceite. Los balancines se apoyan en ejes de acero mediante rodamientos de bola de dos hileras. Se proporciona un casquillo perforado en el extremo de la varilla de empuje del balancín para permitir la transferencia del aceite de la varilla de empuje al tornillo de ajuste de la válvula montado en el extremo de la válvula del balancín. Una tuerca de seguridad, instalada en el tornillo de ajuste el tornillo en su lugar después de ajustar la holgura de la válvula.

En la *figura 6.1* muestra la ubicación del componente Valve Tappet dentro de la sección que es denomino por el manual Crankcase Sections , el cual muestra el despiece explosionado de la sección .

El componente Valve Tappet se encuentra a un esfuerzo compuesto, con una carga dinámica cíclica o alternada y una tensión de compresión, al igual que se encuentra en rozamiento con el casquillo guía, porque está el interior de este.

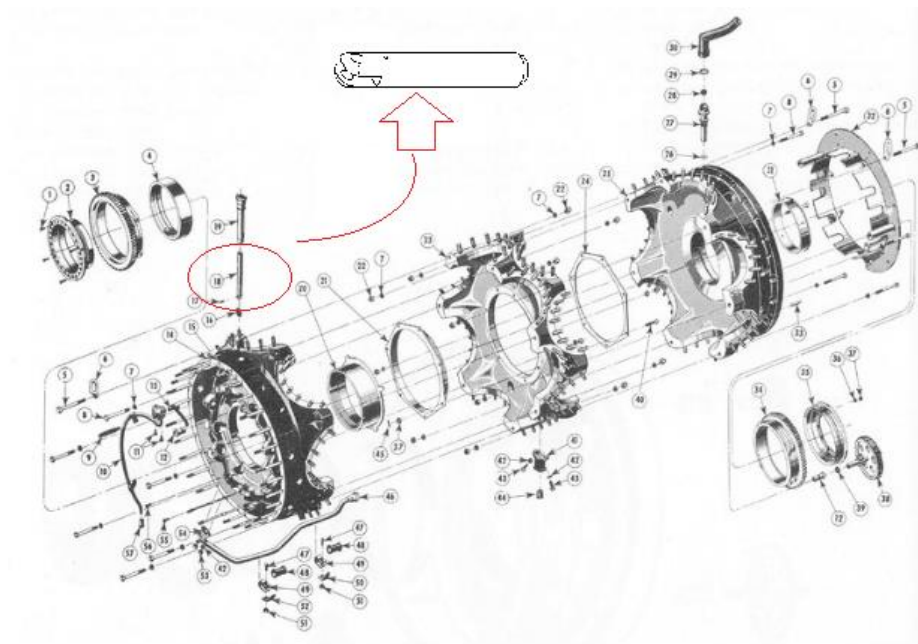


Figura 6-1. Seccion de Caja del cigüeñal. [39]

En la figura 6.2 se muestra el diseño en CAD del componente Valve Tappet



Figura 6-2. CAD Componente Valve Tappet . [14]

6.2. Inspección Visual

De acuerdo con el reglamento aeronáutico colombiano, en función de su cumplimiento de las *parte 4* "Normas de Aeronavegabilidad y Operación de aeronaves", *parte 21* "Certificación de aeronaves y componentes de aeronaves y parte" *parte 43* "Mantenimiento", este componente se obtuvo debido al cumplimiento las normas".

El motor TWIN WASP SIC3G PRATT & WHITNEY por horas de vuelo cumplidas entro a fase de mantenimiento conocida como overhaull, en el cual se hizo una inspección minuciosa a todos sus componentes, por medio del método de tintas penetrantes, ya que por simple inspección visual los componentes del motor no presentaban ninguna falla, debido a esto el componente "Valve Tappet" a pesar de no presentar una falla visible, aparte de un pequeño desgaste *Foto 6.1*, se logró determinar que presentaba varias grietas unas más significativas que otras pero de igual riesgo de falla, las cuales pudieron ocasionar una posible accidente, *Foto 6.5*).

El procedimiento con el cual se logró determinar estas grietas, fue la utilización de tintas penetrantes, ya mencionado anteriormente, se utilizaron dos técnicas diferentes para la confirmación y así darle fiabilidad al resultado de la prueba, el primer método fue por tintas penetrantes con revelador y el segundo con revelado por luz ultravioleta, *foto 6.4* y *foto 6.5* respectivamente.

6.3. Revelado por Tinta Penetrante con Revelador

El procedimiento consistió en el limpiado de la pieza con el fin de eliminar los posibles contaminantes que nos pudieran dar una indicación de falla falsa (Foto 6.2).



Foto 6.2. Líquido penetrante y revelador. [14]

Posterior a esto se aplica el líquido penetrante el cual se introducirá en las grietas que posea el componente Foto 6.3, se esperó treinta minutos y luego se retiró el exceso de líquido penetrante ,dejando la pieza libre de este y aparentemente sin el líquido .



Foto 6.3. Aplicación del líquido penetrante. [14]

Final mente se aplicó el líquido revelador de color blanco el cual a medida que pasaba el tiempo mostraba las fallas en el material , se dejó por treinta minutos y da una indicación positiva de dos grietas A y B .Foto 6.4

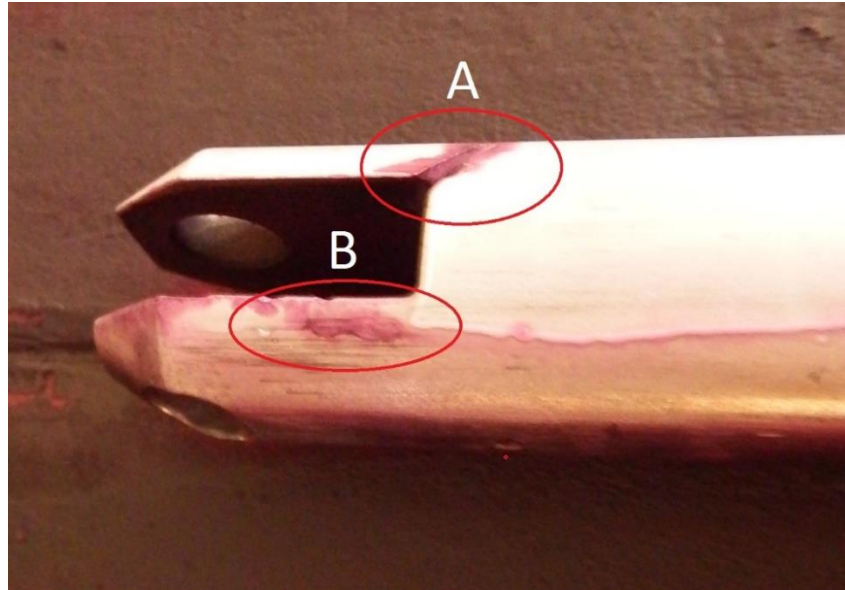


Foto 6.4. Indicación de Falla con Revelador en el Componente Valvet Tappet . [15]

Con el fin de confirmar el ensayo se procede hacer la prueba por medio de líquido penetrante con revelado por luz ultra violeta, limpiando la pieza con el fin de que no queden residuos del anterior ensayo, se aplica el líquido fluorescente y se deja por treinta minutos, se retira el excedente del líquido y si expone a luz ultravioleta en un cuarto oscuro, dando así la confirmación de las misma grietas A y B como se muestra en la Foto 6.5, estos dos procedimientos se hace bajo la norma ASME - E165, que es el documento de referencia con el cual se realizó estas pruebas.

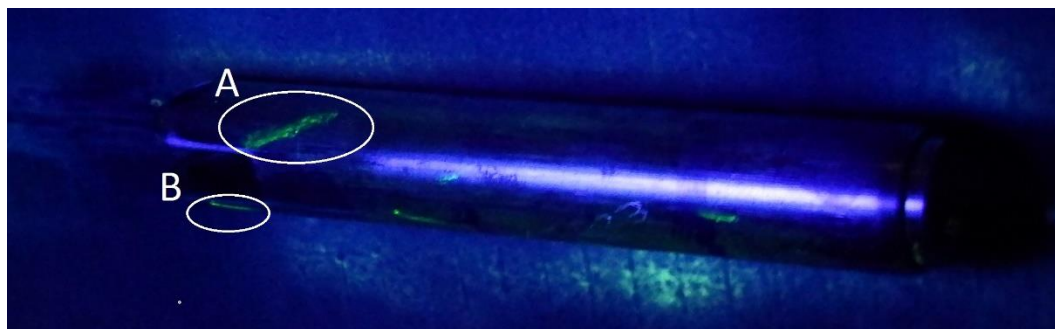


Foto 6.5. Indicación de Falla con Revelador Fluorescente en el Componente Valvet Tappet . [15]

Para el criterio de aceptación de la prueba, se utiliza como referencia el anexo ASME XIII, sección 1, apéndice 8, el cual dice que tenemos dos tipos de indicaciones, una es la lineal, la cual debe medir más de tres veces su ancho y redondas o elípticas, para nuestro caso solo aplicaría las indicaciones lineales las cuales son objeto de nuestro estudio. Para el caso de la grieta A su ancho es de 11,3 micras de 5000 micras, La grieta B su ancho 8,3 micras y su largo es de 3000 micras, por consiguiente sabemos que el criterio de aceptación no aplicaría y se entendería que esta pieza debe ser remplazada ya que es muy probable que tenga una falla.

7. ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL

La ejecución de los ensayos de dureza Rockwell en el componente *Valve Tappet* para el análisis de falla, tiene como fin determinar si los fallos han causado cambios en las durezas superficiales en distintas zonas internas y externas de cada elemento, así interpreta la posible propagación del fallo y como estos cambios han afectado la resistencia del material a los esfuerzos sometidos bajo operación, por ende la provocación del fallo total o parcial del componente.

El ensayo consiste en aplicar dos cargas, una consecutiva a la otra la primera se denomina carga inicial, (P_o) y la segunda carga adicional, (P_{ad}) La dureza Rockwell se basa en el incremento de penetración debido a la carga adicional y una vez eliminada la misma.

Nomenclatura

HR = Dureza Rockwell

E=Escala total del Dial

e= Incremento de la Penetración

se entiende entonces que:

$$\text{Dureza Rockwell} = HR = E - e$$

La escala se obtiene combinando penetradores y cargas totales y se elige de acuerdo a la combinación de ambos y al material a ensayar. En la tabla 1.1 Se dan las escalas conocidas para el sistema HR.

Numero	Escala	Penetrador	Carga Total en Kgf
1	A	Punta Diamante	60
2	D	Punta Diamante	100
3	C	Punta Diamante	150
4	F	Esfera de 1/16"	60
5	B	Esfera de 1/16"	100
6	G	Esfera de 1/16"	150
7	H	Esfera de 1/8"	60
8	E	Esfera de 1/8"	100
9	K	Esfera de 1/8"	150
10	L	Esfera de 1/4"	60
11	M	Esfera de 1/4"	100
12	P	Esfera de 1/4"	150
13	R	Esfera de 1/2"	60
14	S	Esfera de 1/2"	100
15	V	Esfera de 1/2"	150

Tabla 1-1.Tabla de Escalas HR. [15]

Entonces entendemos que para nuestro ensayo se utilizará la nomenclatura siguiente:

Dureza Rockwell C = HRC

Y las cargas empleadas serán:

Carga Inicial $P_0 = 10 \text{ Kgf}$

Carga Adicional $P_{ad} = 140 \text{ Kgf}$

Carga Total $P_t = 150 \text{ Kgf}$

El penetrador es un diamante de tipo industrial esférico-cónico, que tiene un ángulo de 120° y un diámetro de punta de $0,04 \text{ mm}^2$.

Para la lectura del dial, podemos observar, foto 7.1. (c), que tiene 100 divisiones marcadas en la circunferencia exterior de 0 a 100, lo que significa es que la escala total del dial será $E = 100$ divisiones que equivalen a $0,002 \text{ mm}$ de penetración y nos indica que $E = 100 \times 0,002 = 0,20$ - máxima penetración que se puede alcanzar en la escala Rockwell C , que está identificado con "e"

Entonces:

$$\text{Dureza Rockwell C} = \text{HRC} = E - e = 100 - e$$

Siendo e = Incremento de la penetración.

Se aconseja el empleo de la escala C entre un mínimo de HRC = 20 y un máximo de HRC = 70 , para materiales endurecidos por algún tipo de templado voluntario o involuntario.

El ensayos han sido realizados con el durómetro marca Brooks Inspection Equipment , ver tabla 1.2. , con una carga principal 150 kg, y un penetrador de punta de diamante, posee el número de activo fijo 16500 (23580) del laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores, foto 7.1(a). Dicho instrumento antes de ser usado en cada prueba, se ha verificado su calibración usando el patrón base de 61,8 HRC, foto 7.1 (b) para ello se corrobora resultados al medir su respectiva dureza como se aprecia en la foto 7.2 (c), basado en ello, se concluye que los resultados obtenidos durante todo su uso son correctos y verificables en cualquier momento. La práctica internacional recomendada para el procedimiento de las pruebas de dureza en la cual se apoyó este estudio fue ASTM E 18-15 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials [4].



Foto 7.1 (a).Durómetro Rockwell.
[15]

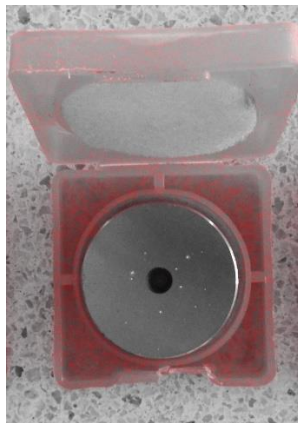


Foto 7.1 (b).Patrón de calibración 61,8 HRC.[15]



Foto 7.1 (c).Calibración con patrón a 61,8 HRC. [15]

Ficha Técnica	
Código	010297
Fuerza Preliminar de Prueba	98.07 N (10 Kgf)
Fuerza de Prueba	588.4 N (60 Kgf) - 980.7N (100 Kgf) - 1471 N (150 Kgf)
Graduación	0.5 HR
Lectura	Analógico (Dial)
Mecanismos de Operación	Manual
Selección de Carga	Manual
Altura Máxima de la Pieza	180 mm
Profundidad Máxima de la Pieza	165 mm (Del centro de el tornillo al cuerpo del durómetro)
Dimensiones	512 x 293 x 780 mm
Peso	48.7 Kg
Escalas	Penetrador Usado
A-D-C	Punta de Diamante de 120º
F-B-G	Esfera de Metal de 1/16"
H-E-K	Esfera de Metal de 1/8 "

Tabla 1-2.Ficha Técnica Durómetro Brooks. [15]

Para realizar las pruebas de dureza, primero se ha realizado un corte transversal en el lugar de las fallas A y B, con la ayuda de la cortadora metalográfica foto 7.2 (a), con el fin de obtener la probeta foto 7.2(b) y 7.2(c), en la cual se realizará las penetraciones y obtener mediciones de dureza del componente Valve Tappet



Foto 7.2 (a).Corte de las Probetas.
[15]



Foto 7.2.Probeta Falla A. [15]



Foto 7.2.Probeta Falla B. [15]

Una vez realizado los ensayos de dureza en diez puntos distintos de la probeta como se observa en la foto 7.3, los resultados obtenidos se registran en la tabla 1.2.



Foto 7.3.Ensayo de Dureza. [15]

El objetivo es comparar las durezas anteriormente encontradas contra las durezas cerca de la superficie del fallo o en el material libre de fallas , es decir muy cerca de la cresta del contacto hipoidal, para ello se realiza un corte longitudinal aproximadamente en la mitad de la probeta que posea la falla (a, b), con el fin de registrar lecturas correctas en el durómetro, se hace un limado superficial del contacto hipoidal y se toman datos de dureza en esta cara obteniendo la probeta las cifras encontradas se describen en la tabla 1.3, Comparando los resultados de las mediciones de dureza hechas en el material que se encuentra libre de fallas da un resultado promedio de 64,02 HRC, la superficie de la falla A presenta durezas fluctuantes promedio de 51 ,92 HRC, para la falla B una dureza fluctuante promedia de 54,67 HRC. Posiblemente este cambio en las durezas se deba a la relación entre el desgaste y el sobrecalentamiento.

<i>Ensayos</i>	<i>Falla A</i>	<i>Falla B</i>	<i>Ensayo Material</i>
1	57	58	60
2	58	58,7	62
3	57,8	60	68
4	60	60	69
5	30	62	62,1
6	57,1	40	65
7	40	60	60
8	56,2	45	69
9	58,1	53	65
10	45	50	60,1
%	51,92	54,67	64,02

Tabla 1.3.Resultados de la Prueba de dureza para las fallas A y B Dadas en HRC. [15]

8. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

La elaboración del análisis microscópico o metalográfico en el componente mecánico Valvet Tappet , para el análisis de falla, tiene como fin observar cambios de composición y microestructura en distintas zonas internas de cada elemento, con ello se interpreta los cambios y como estos han afectado la resistencia del material, por ende la provocación del fallo total o parcial del elemento. La elaboración de este análisis se apoyado en normatividad internacional ASTM E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens [3] y ASTM E 340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys [5].

Los ensayos han sido efectuados con ayuda de distintos instrumentos y materiales los cuales fueron usados y suministrados por el laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Los instrumentos y materiales usados fueron: Microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41 con número de activo 16498-16 ,foto 8.1 (a), máquina de pulido metalográfico con número de activo 25143 Foto 8.1 (c), alúmina u oxido de aluminio, lijas con tamaño de grano 100, 150, 200,250,300,400,800 y 1000, paños de pulido y ácido nítrico al 3 %. En el registro de los análisis de las dos probetas A y B , se implementa unas marcas enumeradas

Sobre la superficie no pulida a espejo de las probetas, esto se realiza para tener una noción de los puntos estudiados, se hacen las marca en la zona no pulida ya que los lentes del microscopio se encuentran en la parte inferior de este foto 8.1(b) , por ello se pone la probeta de forma que la superficie pulida repose sobre la base del mismo.



Foto 8.1 (a).Microscopio metalografico. [15]



Foto 8.1(b). Lentes de observación. [15]



Foto 8.1(c). Pulidora Metalográfica. [15]

8.1. Metalografía Probeta A



Foto 8.2.(a).Probeta A. [15]



Foto 8.2.(b).Puntos de Observación. [15]



Foto 8.2.(c).Punto 1, 10x. [15]



Foto 8.2.(d).Punto 2 , 100x. [15]



Foto 8.2.(e).Punto 3 , 20x. [15]



Foto 8.2.(f).Punto 4 , 50x. [15]

8.2. Metalografía Pobreta B



Foto 8.3.(a). *Probeta B.* [15]



Foto 8.3. (b). *Puntos de Observación.* [15]



Foto 8.3.(c). *Punto 1 ,100x.* [15]



Foto 8.3.(d). *Punto 2 ,100x.* [15]

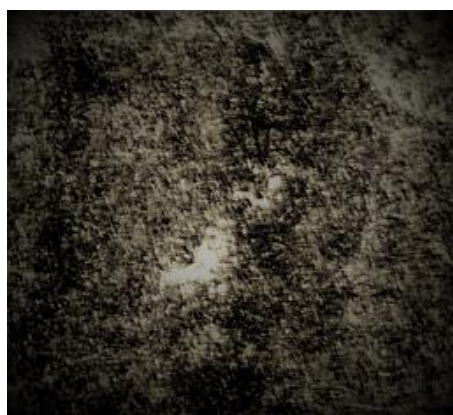


Foto 8.3.(e). *Punto 3,50x.* [15]

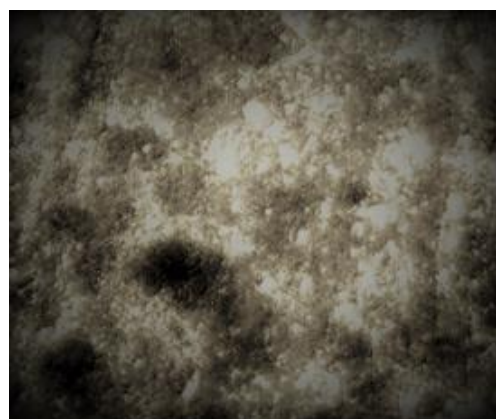


Foto 8.3.(f). *Punto 4,100x.* [15]

9. ANÁLISIS DE FALLA RCA

El Análisis Causa Raíz es una metodología de confiabilidad que emplea un conjunto de técnicas o procesos, para identificar factores casuales de falla o el origen de un problema definido, relacionado con el personal, los procesos, las tecnologías, y la organización, con el objetivo de identificar actividades o acciones rentables que los eliminen.

El análisis de un problema se inicia con la recopilación de datos de fallas de equipos y sus respectivos impactos asociados (en seguridad, ambiente, producción y costos de mantenimiento); con el objeto de jerarquizar las fallas mediante el empleo de histogramas que permitan realizar un tratamiento a los datos. Los datos a recopilar se deberán plasmar en la herramienta computacional disponible en la instalación. Los datos mínimos requeridos son:

- Nombres de la instalación y equipo(s) asociado(s) a la falla.
- Descripción de la falla (Modo de falla).
- Causas de la falla.
- Acciones correctivas ejecutadas.
- Costo de la reparación realizada.(según sea el caso).
- Tiempo fuera de servicio.(según sea el caso).
- Impactos en la seguridad y en el ambiente.
- Condiciones operacionales / tendencias.
- Información específica sobre las fallas: causas inmediatas, estudios previos, fotos, análisis de falla, análisis de laboratorio, entre otros.

Para el proceso de jerarquización requerirá determinar el impacto por cada modo de falla. Para calcularlo se suman los costos de reparación de cada falla y los costos de pérdida de oportunidad por la producción diferida; también se puede calcular multiplicando la frecuencia de fallas por la consecuencia de cada una de ellas.

Se debe generar una lista jerarquizada de los problemas por Riesgo (posible impacto, compuesto por la suma de los aspectos de seguridad, ambiente, producción diferida y costos de mantenimiento). La selección de los problemas a los cuales se aplicara el RCA debe basarse en el orden de la lista jerarquizada. Se recomienda fijar un periodo para la frecuencia de fallas de cada familia y los riesgos cuantificables se darán en dólares/año. Los no cuantificables, por ejemplo, la afectación al ambiente, se emitirá en forma cuantitativa.

Estas sesiones pueden incluir una serie de preguntas sencillas que ayudarán a recopilar la información que el Equipo Natural de Trabajo está buscando, por ejemplo:

- ¿Cuál es el problema? (enunciado).
- ¿Cómo ocurrió el problema?
- ¿Dónde ocurrió el problema? Y ¿Dónde no ocurrió?
- ¿Qué condiciones se presentaron antes de que ocurrirá el problema?
- ¿Qué controles o protecciones pudieron prevenir que ocurriera el problema y no lo hicieron?
- ¿Cuál es el impacto del problema en Seguridad, Ambiente, Producción y Costos de Mantenimiento?

Se presenta a continuación todas las conclusiones del análisis de falla y RCA del componente mecánico estudiado, basado en lo encontrado durante la realización de la inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, también se da un concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido durante el fallo emitiendo una probable causa raíz, así como unas recomendaciones para evitar que un fallo similar se presente. Debido a que solo se conoce como tal las piezas y no se dispuso del sistema total al cual pertenece, se emite un concepto basado en la evidencia tangible que se obtuvo de la pieza.

En el análisis de la microestructura de la probeta A, se observa una distribución de grano fino en las fotografías 8.2 (c,d) concernientes a la periferia puntos 1 y 2 ver foto 8.2 (b), lo cual va acorde con las mayores mediciones de dureza encontradas en las zonas exteriores de la sección transversal. Así mismo, la presencia de grano fino indica el desarrollo de deformación plástica en caliente en las localidades cercanas a la porción de zona de desgaste, lo cual es consecuente con el desgaste observado en dichas locaciones, foto 8.2(e,f). La inspección visual indica un desgaste de tipo adhesivo el cual se encuentra normalmente acompañado de calentamiento y desvanecimiento del desgaste hacia las zonas longitudinales más externas de contactos. En resumen esta pieza fue sometida a calentamiento lo cual genero el desgaste de tipo adhesivo en la zona detallada en la foto 8.2e y f . El motivo de este calentamiento probablemente es producto de falta de lubricación y el contacto entre metales durante el funcionamiento de la pieza lo cual es evidente en ranuras en la superficie del acero; esto también es encontrado durante el maquinado a velocidades altas de aceros hipoeutectoides.

El análisis de la causa raíz puede haber ocurrido por las razones argumentadas en el diagrama de los cinco porque? empleada en la figura 9-1.

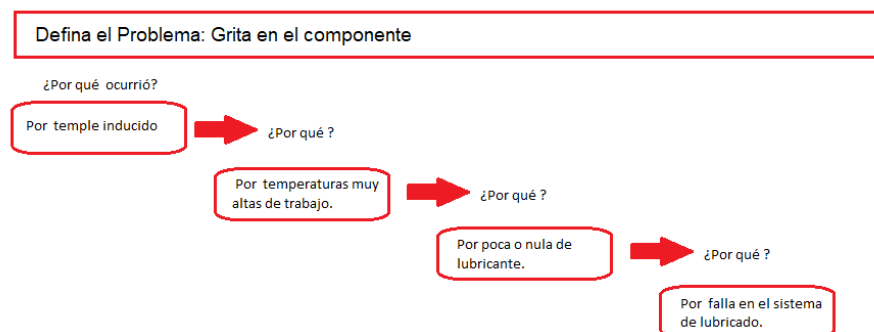


Figura 9.1. Análisis de causas raíz pieza A

Por su parte la probeta B presenta valores de dureza mayores en localidades cercanas a la periferia (puntos 1, 3, 4 ver foto 8.3 (b)), lo que indica que el calentamiento alejado de la zona, fue sujeto a una menor razón de calentamiento. Además el análisis metalográfico indica una distribución homogénea en la probeta B, de granos perlíticos en una matriz ferrítica (ver figura 8-3(e, f)), consecuente con los valores de dureza. A su vez la sección sin falla presenta diferenciación en la microestructura encontrada en la periferia respecto al núcleo de la válvula, esto es un indicio de que el núcleo de la pieza alejada del calentamiento permaneció en su estado original, es decir la pieza presenta un endurecimiento superficial con el fin de disminuir el desgaste durante el servicio. En resumen esta pieza fue sujeta a calentamiento a corto plazo y una distribución no homogénea de la transferencia de calor a lo largo de la pieza lo cual motivo a un cambio en la microestructura en la zona afectada. Este calentamiento puede ser producto de la reducción o ausencia de una capa lubricante que produjo un mayor contacto entre metales durante el funcionamiento lo cual se evidencia con las grietas no perceptibles al ojo. El análisis de la causa raíz puede haber ocurrido por las razones argumentadas en la espina de pescado empleada en la figura 9-2.

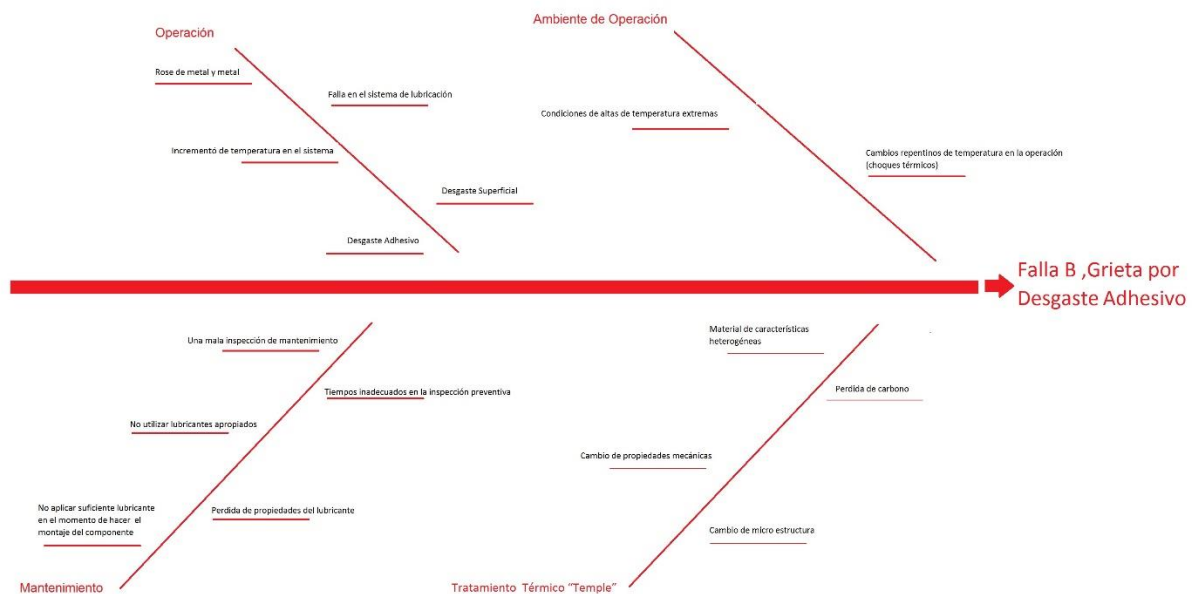


Figura 9.2. Análisis de causas raíz pieza B

10. METODOLOGIA

La metodología que se siguió fue la siguiente:

- **Obtención de la pieza.** Para la obtención de la pieza fue necesario recurrir a la empresa ISOTEC , debido a que esta empresa se dedica a realizar ensayos con tintas penetrantes en diversas áreas de la industria ,incluyendo el sector aeronáutico, ellos cuentan con muchos clientes y gracias a esto fue posible obtener “valve Tappet” y saber con certeza que es un componente vital para el buen funcionamiento del motor **TWIN WASP SIC3G PRATT & WHITNEY.**
- **Determinar la Falla.** Para determinar la falla, también fue necesaria la ayuda de la empresa ISOTEC la cual realizo la detección de la misma, por medio de dos técnicas diferentes , que fueron por medio de tintas penetrantes con revelador y tintas penetrantes por medio de revelado con luz ultra violeta.
- **Ensayo de Dureza.** Al determinar la ubicación de la falla en el material se procede a cortar la pieza con el fin de obtener dos probetas , las cuales están relacionadas con la falla a estudio , cuando se obtiene, se realiza el ensayo de dureza en diferentes partes de las probetas , con el fin de obtener un valor medio ,y así contrastarlo con otras partes de la pieza que no posean falla , para determinar si existe algún cambio en el material y así poder determinar algún indicio.
- **Ensayo Metalográfico.** Para el ensayo metalográfico se procede a realizar la preparación de las probetas que consisten en el lijado y pulido de la probeta, sobre la superficie de estudio, luego se realiza un ataque químico con el fin de observar por medio de un microscopio metalográfico si existen cambios en el material.
- **Análisis de Causa Raíz .**Con base a la información obtenida, como es el modo de operación del componente, al igual que los ensayos realizados ,ya mencionados con anterioridad , se procede a utilizar la técnica de los cinco porqués para la probeta A y el método de espina de pescado para la probeta B , esto con el fin de hacer un análisis minucioso de toda la información obtenida.
- **Conclusiones.** Se concluye en base a la información obtenida y a los métodos utilizados para la obtención de la misma, se da un dictamen desde el punto de vista ingenieril y se hace una recomendación técnica para su futura implementación.

10.1. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos son:

Con el ensayo de tintas penetrantes se pudo determinar el lugar en el cual la pieza tenía grietas, las cuales fueron objeto de estudio y gracias a esta técnica de detección preventiva se pudo detectar fallas de gran importancia para el material y para la operación.

En el ensayo de dureza, se observa un incremento de dureza en el material, lo que nos indica de forma indirecta un proceso de nominado como tratamiento térmico, para nuestro caso sería un temple, pero solo existe esta particularidad en la zona afectada o mejor dicho la zona de estudio en la cual se obtuvo las dos probetas, a y b respectivamente. Lo que generó un imperfecto y un cambio estructural considerable en el componente.

Lo que tendría sentido ya, que se sabe que es un componente que por sus condiciones de operación, dispuestas dentro del sistema se encuentra en constante rozamiento, si se toma en cuenta que al poseer este tipo de tratamiento térmico cambia por completo las propiedades mecánicas del material, ya que tendríamos una imperfección, la que afecta su maleabilidad, aumentando su rigidez en las zonas 3 y 4 de la probeta A y zonas 3,4 y 7 de la probeta B, lo que da como resultado unos pequeños indicios.

En el ensayo metalográfico vemos la *Foto 8.3.(c).Punto 1, 100x*, la cual muestra la estructura de la pieza aumentada 100x, y es un punto alejado de la zona de la falla, es claro que no hay un aumento de martensita o mejor dicho un aumento y o transformación de, también podemos concluir que es un acero al carbón, Y tendría mucho sentido por las condiciones propias de la operación del componente.

Al revisar la *Foto 8.2.(e).Punto 3, 50x, probeta A*, vemos un incremento de martensita que se aprecian como puntos oscuros en el material, esto indica que aumentó considerablemente la temperatura de la pieza y posterior a esto se enfrió rápidamente, justo en este punto, esto generó un aumento de carbono en el material lo que significa una mayor rigidez en la zona.

En la *Foto 8.3.(d).Punto 2, 100x, Probeta B*, se señala con una flecha, que aparte del aumento de martensita, vemos un desgaste adhesivo microscópico, y esto afecta en gran medida la integridad de la pieza.

11. CONCLUSIONES

- El análisis de falla permite comprender las condiciones de trabajo a las cuales fueron sometidos componentes mecánicos con fallas y como la composición, el procesamiento, la estructura y las propiedades definen el rendimiento de los materiales ocasionando que estos no cumplan los requerimientos previamente esperados. A su vez es una herramienta de análisis que busca mejoras en aspectos tales como selección de materiales, diseño, manufactura, mantenimientos y montajes. Casos particulares de estudio llevados a laboratorio (como los tratados en este proyecto y muchos otros previamente documentados en libros y revistas especializadas), logran conclusiones y recomendaciones para que sistemas similares reduzcan la posibilidad de fallos.
- El análisis de falla es una disciplina investigativa que proporciona herramientas para la obtención de conocimientos, que a través de organizaciones internacionales tales como ASTM (American Society for Testing and Materials), ASME (American Society of Mechanical Engineers) y ASM (American Society for Metals) durante muchos años de trabajo e investigación lograron estándares de trabajo, los cuales permiten a personas que inician en el análisis de falla, adquirir una vasta información acerca del comportamiento de los materiales e incentivando a la búsqueda de soluciones del Por qué? y el cómo? de las fallas mecánicas, mediante el uso de razonamiento lógico por medio de lo encontrado en el laboratorio y la bibliografía aportada.
- Los resultados obtenidos en esta investigación se lograron con el uso de los equipos dispuestos por la Fundación Universitaria Los Libertadores, pero como se menciona en el capítulo cuatro existen muchos tipos de exámenes que le permiten al analista conocer con mayor profundidad o ratificar los resultados, por ello un análisis visual, de durezas y microestructura puede en algunos casos no ser suficiente, el uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM) o un espectrómetro de masas seria una ayuda fundamental para la mejora de los análisis de falla.

Recomendaciones

Debido a que la causa raíz del fallo fue provocada por la falta de lubricación por falla del retén que controla el paso del lubricante, se recomienda prestar la debida atención en los montajes de estas piezas, también la calidad del lubricante, recomendando el uso de lubricantes aditivos EP que reducen la posibilidad de desgaste adhesivo y una correcta aplicación del mismo previo al ensamble [26][34].

En las mediciones de dureza para el componente, se encuentra que la probeta A, presenta calentamiento superficial, lo que genero durezas homogéneas que sugieren un calentamiento uniforme y prolongado de la pieza durante el servicio.

Durante el montaje de esta pieza mecánica se debe aplicar una correcta cantidad de grasa o aceite dependiendo de las recomendaciones del fabricante que evite el contacto metal a metal, usar grasas de clasificación NLGI 2, por ende se sugiere usar grasas semi-solidas de base de litio muy aceptables como producto multiusos para requisitos de automoción, cuyo régimen de lubricación soporta altas temperaturas de trabajo así como otros requerimientos, también recomienda intervalos de re lubricación de 3200 horas ya que en este periodo de tiempo la grasa puede perder sus propiedades y conllevar a su degradación [5] [12] [24].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. I. H. Commtee, ASM Handbook : Fractography, ASM International , 1987.
- [2] A. .. E. d. E. N. Destructivos, Líquidos Penetrantes Nive II, vol. Vol 2, Madrid: Fundación Cofemetal, 2005, pp. 9-30.
- [3] Ramachandran, Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories, U.S.A: ASM International,, 2005.
- [4] E. ASTM, «ASTM D4950-01,» 2004.
- [5] E. A. E.-0. ASTM, Standard Guide for preparation of Metallographic Specimens, Annual book of ASTM Standars , 2001.
- [6] A. Committee, ASRM dictionary of engineering science and technology, ASTM International , 2005.
- [7] G. F., Metallography and Microstructures, vol. Vol. 9, ASM International,: ASM International, 2004.
- [8] Noon y K. Randall, Forensic Engineering investigation, 2000.
- [9] J. C. Cil, C. Ferrer Giménez, M. Pascual Guillaón y M. Á. Perez Puig, Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid: Pearson, 2005, pp. 147-157.
- [10] M. C. R. Cruz, « Análisis de Falla,» *Metal Actual*, pp. 3-5.
- [11] D. A. K., Metallurgy of failure analysis, vol. 132, New York: McGraw-Hill, 1997, p. 34.
- [12] S.-i. Nishida, Failure analysis in engineering applications, Butterworth Heinemann, 2012.
- [13] C. F. C, « Fatigue and fracture: understanding the basics,» ASM International, 2012.
- [14] P. E. N. Varon, *Valve Tappet*, Bogota D.C: Autor , 2018.
- [15] ISOTEC, «ISOTEC,» 23 Junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.isotec.com.co/es/>.
- [16] A. J. d. Santis, Análisis de Fallos en Sistemas Aeronauticos, Madrid: Paraninfo, 2015, pp. 395-399.
- [17] E. E. M. Diaz, Ingeniería de Puentes, vol. 1, Bogota D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2012, pp. 58-59.
- [18] H. H. Albañil y E. Espejo Mora, Mecánica de fractura y análisis de falla, Bogotá D.C.: El Malpensante S.A, 2001, pp. 33-57.
- [19] NASA, «Reliability centered maintenace guide for facilities and collateral equipment,» *Reported*, pp. 1-3, 2008.
- [20] W. Shipley, Failure Analysis and Prevention, vol. 11, Boston: ASM International. Handbook Committee,, 2002.
- [21] G. F, ASM INTERNATIONAL .HANDBOOK COMMITTE, vol. 9 : Metallography and Microstructures, ASM International , 2004.
- [22] W.T. y R. Shipley , ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, vol. 11: Failure Analysis and Prevention , ASM International: Asm Handbook, 2002.
- [23] A. E. .: E18-15, Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Materials, Annual Book of ASTM Standars, 2003.
- [24] E. ASTM, ASMT E340-00 - Standar Test Method for Macroetching Metals and Alloys, Annual Book of ASTM Standars , 2013 .
- [25] U. Avallone, BEUMEISTER III, Heodore ; SADEGH, Lim: Standard Handbook or Mechanical Engineers, vol. 11 , USA: McGraw-Hill, 1987.
- [26] AWS, Committe: AWS B1.11:2000 Guide for the Visual Inspection of Welds, Chicago : American Welding Society, 2000.
- [27] J. BATTACHARYA, «Root Cause Analysis Apractice to Understanding and control the Failure Management in Manufacturing Industry,» *International Journal of Pharmaceutical Sciencie Invention* , pp. 12-20, 2014 .

- [28] B. Bhushan, «Modern tribology handbook,» vol. 2, 2000.
- [29] Bloch, R. E, P. Heinz, Geitner y K. Fred, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting ; Practical Machinery Management for Process Plants, vol. 2, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [30] Booser y R. E, Handbook of lubrication and Tribology :Theory and Practice of Tribology, 1993.
- [31] F. C. Campbell, Fatigue and fracture :understanding the basic, ASM International , 2012.
- [32] CANALE, f. Loralice de los Campos , G. Totten y R. Mesquita , Failure analysis of heat treated steel components, ASM International, 2008.
- [33] Das y k. Amiya , Metallurgy of failure analysis, vol. 132, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [34] Groover y p. Mikell , Fundamentos de Manufactura Moderna:materiales,procesos y sistemas, Mexico : Pearson Educacion , 1997.
- [35] c. Hellier, Handbook of nondestructive evaluation, McGraw-Hill, 2001.
- [36] Kutz y Myer , Handbook of materiales selection, John and Sons , 2002.
- [37] Livingston, D. A, J. G y K. Priestley , Root causes analysis : Literature Review, 2001: HSE Contact Research Report .
- [38] Losada, C. O y j. Rodriguez , «Tribologia y lubricacion en ensayo de banco,» *Ciencia Ergo-Sum*, vol. 8, nº 2, pp. 184-190, 2015.
- [39] McEvelly y A. j, Metal failures:Mechanisms, analisis ,prevention, Jhon Wiley and Sons , 2002.
- [40] R. K. Mobley, Root cause Failure Analysis, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [41] Nishida y S.-i. , Failure Analysis in Engineering Applications, Butterworth-Heinemann, 1992.
- [42] Oliveros y M. Dolores , practicas de ciencia de los materiales :fundamento y desarrollo, vol. 25, EDITUM, 1992.
- [43] Paradies, Mark, Busch y David, «Root cause analysis at the savannah river plant,» de *IEEE Fourth Conference on Human Factors and power Plants* , New York, 1988.
- [44] w. Piekoszewski, Szczerek,M y Tuszyński, The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester, *Wear*, 2001.
- [45] Purbolaksono, j. Ahmad , L. C. Beng , A. Z. Rashid, A. Khinani y A. A. Ali, «Failure Analysis on a primary superheater tube of a power plant,» *Engineering failure*, vol. 17, nº 1, pp. 158-167, 2010.
- [46] Ramachandran, Failure analysis of engineering structures :methodology and case histories, ASM International , 2005.
- [47] Schmid y R. Steven, Manufatrura ,ingenieria y tecnologia, Pearson Edición, 2002.
- [48] Schnubel y Mark, Today's Technician : Automative Suspension and Steering Classroom Manual and Shop Manual, Cengage Learning , 2014.
- [49] Serrat y Olivier , The five whys Technique, 2009.
- [50] Stephens, Ralph, A. Fatemi, R. R. Stephens , Fuchs y O. Henry, Metal fatigue in engineering, John Wiley and sons , 2000.
- [51] V. Vander y G. F, Metallography,principales and practice, ASM International, 1984.
- [52] V. Vander y G. F, Visual Examination and light microscopy, ASM International , 1991 , pp. 91-165.
- [53] M. Villacourt y P. Govil, Failure Reporting ,Analysis and Corrective Action System, Sematch , 1994.
- [54] Wilson y P. F, Root Cause Analysis : A tool for total quality management, Quality Press, 1993.
- [55] Wulpi y J. Donald, Undersstading how componets fail, ASM International , 2013.
- [56] P. E. N. Varon, Referencia de Autor, Bogota D.C.: Los libertadores, 2018.